



TESIS - TM 142501

**SIMULASI NUMERIK ALIRAN MELALUI PIPA
SIRKULAR DENGAN VARIASI SUDUT BUKAAN
KATUP PADA BILANGAN REYNOLDS 2×10^5 DAN
 8×10^5**

MAHMUD

Nrp. 2114 202 009

DOSEN PEMBIMBING :

Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN REKAYASA KONVERSI ENERGI

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016



TESIS - TM 142501

NUMERICAL SIMULATION OF FLOW THROUGH CIRCULAR PIPE WITH MAGNITUDE OF VALVE OPENING AS VARIANT AT REYNOLDS NUMBER 2×10^5 AND 8×10^5

MAHMUD

Nrp. 2114 202 009

SUPERVISOR :

Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

MASTER PROGRAM

FIELD STUDY OF ENERGY CONVERSION ENGINEERING

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2016

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)

di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
MAHMUD
Nrp. 2114202009

Tanggal Ujian : 18 Juli 2016
Periode Wisuda : September 2016

Disetujui Oleh :

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.
NIP. 19710405 199702 1 001



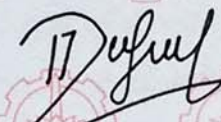
(Pembimbing)

2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng., Ph.D.
NIP. 19641228 199003 1 002



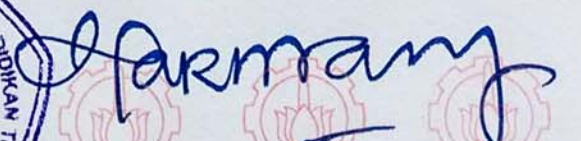
(Penguji)

3. Dedy Zulhidayat Noor, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 19751206 200501 1 002



(Penguji)

Direktur Program Pascasarjana,



Prof. Ir. Djauhar Manfaat, M.Sc., Ph.D.
NIP. 19601202 198701 1 001

**SIMULASI NUMERIK ALIRAN MELALUI PIPA SINGKULAR
DENGAN VARIASI SUDUT BUKAAN KATUP
PADA BILANGAN REYNOLDS 2×10^5 DAN 8×10^5**

Nama Mahasiswa : Mahmud
NRP : 2114202009
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

ABSTRAK

Dalam sistem perpipaan terdapat banyak komponen pendukung seperti *elbow* dan *valve* yang memiliki kerugian tekanan terhadap aliran. Hal tersebut disebabkan oleh perubahan arah aliran dan efek hambatan yang terjadi di dalam pipa salah satunya ketika aliran melewati *elbow* dan *valve*.

Domain dalam penelitian ini adalah pipa dengan diameter 300mm yang terhubung dengan *elbow* 90° dan *butterfly valve* pada jarak 1D setelah *valve*. Fluida kerja adalah udara pada bilangan Reynolds 2×10^5 dan 8×10^5 berdasarkan diameter dan kecepatan aliran. *Butterfly valve* diatur pada sudut bukaan 0° vertikal, 0° horizontal, 30° CW horizontal, dan 30° CCW horizontal. Penelitian ini menggunakan turbulen k- ω SST dan dilakukan pada kondisi steady.

Analisa terhadap profil dan vektor kecepatan menunjukkan hingga akhir *downstream* tidak ada aliran yang mencapai kondisi *fully recovery* dikarenakan masih adanya pengaruh *secondary flow*. Berdasarkan profil dan vektor kecepatan, *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal lebih baik dibandingkan dengan *valve* pada sumbu vertikal, *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW lebih baik dibandingkan $\alpha=30^\circ$ CCW karena pada akhir *downstream* lebih mendekati kondisi *fully recovery*. Berdasarkan penurunan tekanan, *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW memiliki kerugian tekanan yang lebih kecil dibandingkan *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW. Bilangan Reynolds tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap aliran yang melewati *elbow*, namun cukup berpengaruh ketika aliran melewati *valve*.

Kata kunci : Pipa, *Elbow*, *Butterfly Valve*, Profil Kecepatan.

**NUMERICAL SIMULATION OF FLOW THROUGH CIRCULAR PIPE
WITH MAGNITUDE OF VALVE OPENING AS VARIANT
AT REYNOLDS NUMBER 2×10^5 AND 8×10^5**

Name : Mahmud
NRP : 2114202009
Department : Mechanical Engineering, FTI-ITS
Supervisor : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.

ABSTRACT

Piping system consist of supporting components such as elbow and valve that causes losses. It is caused by changes in flow direction and the blockage effect that occurs in the pipeline.

Domain of this study is steel pipe with diameter of 300 mm where between the upstream and downstream connected by 90° elbow and butterfly valve installed distance 1D after elbow. Air uses as working fluid at Reynolds number 2×10^5 dan 8×10^5 based on hydrolic diameter and velocity . Butterfly valve is set at an angle of aperture 0° vertically, 0° horizontally, 30° CW horizontally, and 30° CCW horizontally. Simulation conduct at steady condition and $k-\omega$ SST selected as turbulent model.

Analyzed of velocity vector and profile shows until end of downstream no one of simulation reach fully recovery state caused by there is influence of secondary flow. based on velocity profile and vector, valve at $\alpha=30^\circ$ CW give better results $\alpha=30^\circ$ CCW than because it closer to fully recovery profile. Based on pressure drops, valve $\alpha=30^\circ$ CCW give pressure drops smaller than $\alpha=30^\circ$ CW. Reynolds number has no significant effect to the flow through elbow, but give effect when the flow passing the valve.

Keywords : Pipe, Elbow, Butterfly Valve, Velocity Profile.

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 2.1 Gerakan fluida dalam sebuah <i>streamline</i> (Fox, 2010) | 7 |
| Gambar 2.2 Separasi lapisan batas..... | 9 |
| Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan (Miller, 1990)..... | 10 |
| Gambar 2.4 Aliran sekunder (Miller, 1990)..... | 11 |
| Gambar 2.5 Berbagai jenis bentuk <i>mesh</i> | 15 |
| Gambar 2.6 Skema pengujian | 21 |
| Gambar 2.7 Profil kecepatan pada pipa tanpa <i>elbow</i> dan sudut bukaan <i>valve</i> 0° | 22 |
| Gambar 2.8 Profil kecepatan pada pipa tanpa <i>elbow</i> dan sudut bukaan <i>valve</i> 30° | 22 |
| Gambar 2.9 Profil kecepatan pada pipa dengan <i>elbow</i> 90° dan sudut bukaan <i>valve</i> 0° | 22 |
| Gambar 2.10 Profil kecepatan pada pipa dengan <i>elbow</i> 90° dan sudut bukaan <i>valve</i> 30° | 22 |
| Gambar 2.11 Grafik intensitas aliran <i>swirl</i> | 23 |
| Gambar 2.12 Perbandingan koefisien <i>pressure losses</i> | 24 |
| Gambar 2.13 Aliran <i>swirling</i> pada <i>valve</i> | 25 |
| Gambar 2.14 Grafik <i>pressure drop</i> | 25 |
| Gambar 2.15 Profil kecepatan pada <i>downstream</i> dengan bukaan <i>valve</i> 0° dan 75° | 26 |
| Gambar 2.16 Profil Kecepatan aliran setelah melewati <i>valve</i> | 26 |
| Gambar 2.17 Profil Kecepatan Pada <i>Elbow</i> dengan Beberapa Variasi Re dan Radius <i>Elbow</i> a) $R_c/D = 1$, b) $R_c/D = 2$, c) $R_c/D = 3$, d) $R_c/D = 4$, e) $R_c/D = 5$ (Dutta dan Nandi, 1995)..... | 28 |
| Gambar 2.18 Profil dan vektor kecepatan pada $Re\ 1 \times 10^5$ dengan radius 1D (Dutta dan Nandi, 1995) | 29 |
| Gambar 2.19 Perbandingan Bilangan Reynolds Terhadap Koefisien <i>Pressure Losses</i> (Kimura, dkk, 1995)..... | 30 |

| | |
|---|----|
| Gambar 2.20 Pengaruh sudut bukaan <i>Valve</i> terhadap Koefisien <i>Pressure Losses</i> (Kimura, dkk, 1995) | 31 |
| Gambar 3.1 Geometri pipa dengan bukaan <i>valve</i> 0° horizontal | 34 |
| Gambar 3.2 <i>Mesh</i> pada penampang melingkar pipa dan <i>elbow</i> | 36 |
| Gambar 3.3 Penampang <i>mesh</i> pada <i>elbow</i> dan <i>valve</i> 0° horizontal | 36 |
| Gambar 3.4 Domain simulasi dan kondisi batas pada model pipa | 37 |
| Gambar 3.5 Lokasi pengambilan data | 38 |
| Gambar 3.6 Profil kecepatan pada $x/D=5$ | 40 |
| Gambar 3.7 Diagram alir penelitian | 41 |
| Gambar 4.1 Perbandingan profil kecepatan pada uji model turbulen pada posisi $x/D=0;1;2;3;4;5;7;9;11;13;15$ | 45 |
| Gambar 4.2 Kontur dan vektor kecepatan untuk <i>valve</i> terbuka penuh pada sumbu vertikal dan horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 46 |
| Gambar 4.3 Kontur dan vektor kecepatan untuk <i>valve</i> dengan $\alpha=30^\circ$ CW dan CCW pada sumbu horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 48 |
| Gambar 4.4 Kondisi aliran dengan $Re\ 2 \times 10^5$ pada jarak 2D sebelum melewati <i>elbow</i> a) profil kecepatan, b) vektor kecepatan | 48 |
| Gambar 4.5 Perbandingan profil kecepatan <i>valve</i> terbuka penuh pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 50 |
| Gambar 4.7 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka penuh secara vertikal pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 53 |
| Gambar 4.8 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka penuh secara horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 54 |
| Gambar 4.9 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka $\alpha=30^\circ$ CW pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 56 |
| Gambar 4.10 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka $\alpha=30^\circ$ CCW pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 57 |
| Gambar 4.11 Kontur dan vektor kecepatan untuk <i>valve</i> terbuka penuh pada sumbu vertikal dan horizontal pada $Re\ 8 \times 10^5$ | 58 |
| Gambar 4.12 Kontur dan vektor kecepatan untuk <i>valve</i> dengan $\alpha=30^\circ$ CW dan CCW pada sumbu horizontal pada $Re\ 8 \times 10^5$ | 59 |
| Gambar 4.13 Kondisi aliran dengan $Re\ 8 \times 10^5$ pada jarak 2D sebelum melewati <i>elbow</i> a) profil kecepatan, b) vektor kecepatan | 60 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.14 Perbandingan profil kecepatan <i>valve</i> terbuka penuh pada Re 8x10 ⁵ | 62 |
| Gambar 4.15 Perbandingan profil kecepatan <i>valve</i> terbuka 30° pada Re 8x10 ⁵ | 63 |
| Gambar 4.16 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka penuh vertikal pada Re 8x10 ⁵ | 64 |
| Gambar 4.17 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka penuh horizontal pada Re 8x10 ⁵ | 65 |
| Gambar 4.18 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka 30° CW pada Re 8x10 ⁵ | 67 |
| Gambar 4.19 Vektor kecepatan pada <i>valve</i> terbuka 30° CCW pada Re 8x10 ⁵ | 68 |
| Gambar 4.20 Grafik <i>pressure lossess coefficient</i> untuk posisi <i>valve</i> tertentu..... | 69 |
| Gambar 4.21 Kontur tekanan pada Re 2x10 ⁵ | 71 |
| Gambar 4.22 Kontur tekanan pada Re 8x10 ⁵ | 72 |
| Gambar 4.23 Perbandingan Profil Kecepatan Pada Pipa Tanpa <i>Valve</i> Antara Simulasi Dengan Eksperimen..... | 74 |
| Gambar 4.24 Pengaruh Bilangan Reynolds Terhadap Profil Kecepatan | 75 |
| Gambar 4.25 Perbandingan profil kecepatan pada <i>valve</i> yang dipasang pada sumbu horizontal pada Re 2x10 ⁵ | 78 |
| Gambar 4.26 Perbandingan vektor kecepatan pada <i>valve</i> yang dipasang pada sumbu horizontal pada Re 2x10 ⁵ | 80 |

DAFTAR ISI

| | |
|---|----------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| <i>ABSTRACT</i> | v |
| ABSTRAK | vii |
| KATA PENGANTAR..... | ix |
| DAFTAR ISI..... | xi |
| DAFTAR GAMBAR..... | xv |
| DAFTAR TABEL | xix |
| DAFTAR SIMBOL | xxi |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Rumusan Masalah | 4 |
| 1.3. Batasan Masalah..... | 4 |
| 1.4. Tujuan Penelitian..... | 5 |
| 1.5. Manfaat Penelitian..... | 5 |
| 1.6. Sistematika Penulisan..... | 5 |
| BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI..... | 7 |
| 2.1. Aliran Dalam Pipa | 7 |
| 2.1.1 Persamaan Euler dalam Koordinat <i>Streamline</i> | 7 |
| 2.1.2 Bilangan Reynolds | 8 |
| 2.1.3 Separasi Aliran..... | 9 |
| 2.1.4 Aliran Sekunder | 10 |
| 2.1.5 <i>Pressure Drop</i> | 11 |
| 2.2. CFD (Computational Fluid Dynamics) | 12 |
| 2.2.1. Karakteristik CFD..... | 13 |
| 2.2.2. Langkah-Langkah Simulasi CFD | 14 |
| 2.2.3. Mesh | 14 |
| 2.2.4. Kondisi Batas | 15 |
| 2.2.5. <i>Grid</i> Independensi | 17 |

| | | |
|---|--|-----------|
| 2.2.6. | Model Turbulen..... | 17 |
| 2.3. | Penelitian Terdahulu | 19 |
| BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN | | 33 |
| 3.1. | Geometri Pipa | 33 |
| 3.2. | Parameter Uji | 34 |
| 3.3. | Metode Numerik | 35 |
| 3.4.1. | Tahap Pre Processing | 35 |
| 3.4.2. | Tahap Processing | 37 |
| 3.4.3. | Tahap Post Processing..... | 38 |
| 3.4. | <i>Grid</i> Independensi dan Validasi | 39 |
| 3.5. | Diagram Alir Penelitian | 41 |
| BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN | | 43 |
| 4.1. | Uji Model Turbulen | 43 |
| 4.2. | Karakteristik aliran pada pada $Re\ 2 \times 10^5$ | 46 |
| 4.2.1. | Profil Kecepatan <i>Valve</i> 0° pada Sumbu Vertikal dan Horizontal..... | 49 |
| 4.2.2. | Profil Kecepatan pada <i>Valve</i> 30° CW dan 30° CCW | 50 |
| 4.2.3. | Vektor Kecepatan pada <i>Valve</i> 0° pada Sumbu Vertikal dan Horizontal..... | 52 |
| 4.3. | Karakteristik Aliran pada $Re\ 8 \times 10^5$ | 57 |
| 4.3.1. | Profil Kecepatan pada <i>Valve</i> 0° pada Sumbu Vertikal dan Horizontal..... | 61 |
| 4.3.2. | Profil Kecepatan pada <i>Valve</i> 30° CW dan 30° CCW | 62 |
| 4.3.3. | Vektor Kecepatan pada <i>Valve</i> 0° Vertikal dan Horizontal..... | 64 |
| 4.3.4. | Vektor Kecepatan pada <i>Valve</i> 30° CW dan 30° CCW | 66 |
| 4.4. | <i>Pressure Drop</i> | 68 |
| 4.5. | Diskusi | 73 |
| 4.5.1. | Perbandingan Simulasi dengan Eksperimen | 73 |
| 4.5.2. | Pengaruh Bilangan Reynolds terhadap Profil Kecepatan | 74 |

| | |
|---|-----------|
| 4.5.3. Perbandingan <i>Valve</i> pada Sumbu Horizontal dengan $\alpha=0^\circ$, 30° CW, dan 30° CCW | 77 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN | 83 |
| 5.1 Kesimpulan..... | 83 |
| 5.2 Saran | 84 |
| DAFTAR PUSTAKA | 85 |

DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1 Penelitian terdahulu..... | 19 |
| Tabel 3.1 Pengaturan parameter processing..... | 37 |
| Tabel 3.2 Hasil <i>grid</i> independensi dan validasi pada model tanpa <i>valve</i> | 39 |
| Tabel 4.1 Tekanan pada <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> pipa | 69 |

DAFTAR SIMBOL

| | |
|----------|---|
| CW | = Clockwise (searah jarum jam) |
| CCW | = Counter clockwise (berlawanan arah jarum jam) |
| D | = Diameter (mm) |
| K | = Konstanta <i>pressure losses</i> |
| p | = Tekanan statis (pascal) |
| R | = Radius (mm) |
| Re | = Bilangan Reynolds |
| RNG | = Renormalization group |
| SST | = Shear stress transport |
| u | = Kecepatan pada titik tertentu (m/s) |
| U | = Kecepatan aliran bebas (m/s) |
| Δ | = Selisih dua parameter |
| ρ | = Massa jenis (kg/m^3) |
| μ | = Viskositas kinematis fluida (kg/ms) |
| ∞ | = Daerah <i>free stream</i> |
| α | = Sudut bukaan <i>valve</i> |

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Pada penelitian ini akan dilakukan studi mengenai pengaruh yang ditimbulkan oleh *elbow* dan *valve* berjenis *butterfly* yang terdapat dalam aliran dalam sebuah pipa. Penelitian ini dibagi menjadi 5 bagian, bab 1 akan membahas mengenai latar belakang, masalah, dan hasil yang ingin dicapai. Bab 2 membahas mengenai landasan-landasan teori dan penelitian-penelitian terdahulu yang mendukung penelitian ini, sedangkan bab 3 membahas mengenai metodologi yang akan dilakukan dalam penelitian ini untuk mencapai hasil yang diharapkan. Dalam bab 4 akan dibahas mengenai hasil-hasil yang diperoleh dalam simulasi dengan melakukan analisa terhadap kontur kecepatan, kontur tekanan, profil kecepatan, dan vektor kecepatan untuk disimpulkan dan melihat hal-hal yang dapat dilakukan dalam penelitian lanjutan dalam bab 5.

Sistem perpipaan merupakan salah satu bagian yang memiliki peranan penting dalam hampir semua industri, seperti pengolahan air minum, pembangkit listrik, pengkondisian udara, dan lain-lain untuk memindahkan fluida dari satu tempat ke tempat lainnya. Dalam sistem perpipaan terdapat beberapa komponen pendukung yang sesuai dengan sistem dimana perpipaan tersebut digunakan. Salah satu komponen pendukung yang selalu ada dalam sistem perpipaan adalah *fitting*, salah satunya berupa *elbow* untuk membelokkan arah aliran fluida dalam pipa sedangkan untuk sistem yang memerlukan pengaturan laju aliran massa diperlukan *valve* yang menjadi pengganggu aliran untuk menghambat laju aliran massa. Kedua komponen ini mengakibatkan *losses* dan *pressure drop* sepanjang aliran yang dapat menambah kerugian energi dalam sistem. Kedua hal tersebut juga dapat mempengaruhi profil kecepatan sepanjang aliran, terutama pada sisi *downstream*, sehingga dapat mempengaruhi keakuratan instrumen pengukur yang terpasang pada daerah tersebut.

Pada aliran yang melewati *elbow* nilai *pressure drop* dan *losses* yang terjadi lebih besar dibandingkan dengan aliran yang melewati pipa lurus dengan panjang

dan diameter pipa yang sama. Fenomena ini terjadi dikarenakan aliran yang melewati *elbow* maupun pipa lurus mengalami kerugian akibat gesekan (*friction losses*). Kerugian pada aliran melewati *elbow* lebih besar karena disamping terjadi fenomena tersebut, juga ditambah dengan kerugian akibat terjadinya separasi (*separation loss*) dan aliran sekunder. Separasi yang timbul diakibatkan oleh perubahan arah aliran fluida yang melewati saluran sehingga aliran tidak mampu melawan *adverse pressure gradient* sehingga mengakibatkan aliran akan terpisah dari aliran utamanya dan membentuk *vortex*. Aliran sekunder terjadi dikarenakan adanya perbedaan tekanan pada *inner wall* dan *outer wall*, perbedaan tekanan ini terlihat pada distribusi tekanan pada sisi *outer wall* lebih besar dibanding sisi *inner wall*, sehingga memungkinkan partikel fluida *outer wall* bergerak menuju *inner wall*. Gerakan partikel ini menyebabkan laju aliran fluida terhambat. Separasi yang terjadi pada aliran melewati *valve* sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri dari *valve* itu sendiri, salah satu jenis *valve* yang sering digunakan dalam industri adalah jenis *butterfly valve*. *Valve* jenis ini memiliki piringan dengan poros yang dapat diputar dari sudut 0° (*valve* terbuka penuh) hingga 90° (*valve* tertutup penuh) untuk mengatur laju aliran dalam pipa yang menimbulkan *blockage effect*. Adanya separasi dan aliran sekunder dalam aliran secara langsung dapat menimbulkan *pressure drop* yang berakibat mengurangi *head* yang dibutuhkan oleh sistem, sehingga diperlukan daya yang lebih besar untuk memenuhi kebutuhan *head* dalam sistem.

Upaya untuk mengamati fenomena aliran melewati *elbow* sudah pernah dilakukan sebelumnya oleh **Kim, dkk** (2013) melakukan penelitian untuk melihat fenomena aliran swirling *secondary flow* pada *downstream* sebuah *elbow* secara CFD. Penelitian dilakukan dengan cara membandingkan berbagai macam model turbulen untuk memperoleh model turbulen yang sesuai dengan eksperimen. Simulasi pada pipa 3D dengan *elbow* 90° , *upstream* 20D dan *downstream* 50D dengan bilangan Reynolds 5×10^4 hingga 2×10^5 menunjukkan bahwa model turbulence k- ϵ RNG memberikan hasil yang lebih mendekati eksperimen, yaitu intensitas swirling pada daerah kecepatan *tangensial* yang menurun secara eksponensial sepanjang aliran setelah melewati *elbow*, laju disipasi lebih cepat seiring dengan semakin besarnya radius *elbow*. Laju disipasi ini juga dipengaruhi

oleh bilangan Reynolds, dari berbagai variasi yang ada menunjukkan intensitas *swirling* pada keluaran *elbow* menunjukkan karakteristik yang sama.

Dawy, dkk (2013) melakukan penelitian pada *butterfly valve* secara CFD dengan model turbulen k- ϵ standar untuk melihat karakteristik aliran pada *incompressible flow* dan performa *valve* pada beberapa sudut bukaan. *Valve* berdiameter 50mm terletak pada pipa berdiameter 52mm dengan *upstream* dan *downstream* masing-masing 2D dan 15D. Pada bukaan penuh aliran terlihat halus dengan zona separasi yang sangat kecil pada *valve*, seiring dengan semakin besarnya bukaan *valve* aliran menjadi semakin turbulen dan separasi semakin meningkat pada *valve* yang meningkatkan *pressure drop* pada aliran setelah melewati *valve*. Profil kecepatan aliran setelah melewati *valve* lebih cepat kembali ke posisi normal pada *valve* terbuka penuh dibandingkan dengan *valve* dengan sudut bukaan yang lebih besar. Sedangkan *flow coefficient* semakin menurun seiring dengan semakin besarnya sudut bukaan *valve*, hal ini juga berlaku terhadap peningkatan *pressure drop* yang semakin besar seiring dengan meningkatnya sudut bukaan *valve*,

Danbon dan Sollic (2000) melakukan penelitian pada pipa lurus dan pipa dengan *elbow* 90° berdiameter 0,3m dengan *downstream* sepanjang 11D yang dilengkapi dengan *butterfly valve* yang terletak setelah *elbow* dengan bukaan 0° (terbuka penuh) dan 30°. Pengambilan data pada bilangan Reynolds $5.0 \times 10^4 < Re < 10^6$ memperoleh grafik profil kecepatan yang menunjukkan adanya aliran sekunder yang disebabkan oleh *elbow* dan mempengaruhi profil kecepatan yang lebih besar pada sisi *outer elbow* dari x/D 1 hingga 7. Sedangkan pada aliran yang melewati *butterfly valve* dengan bukaan 30° lebih cepat lambat ke profil normal dikarenakan adanya *blockage effect* oleh *valve* lebih besar bila dibandingkan dengan bukaan 0°.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, dapat disimpulkan bahwa posisi *elbow* dan *butterfly valve* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik aliran pada sisi *downstream*. Mengingat besarnya pengaruh yang ditimbulkan, maka penulis tertarik untuk melakukan penelitian ini dengan melakukan modifikasi arah bukaan *butterfly valve*.

1.2. Rumusan Masalah

Fluida yang mengalir melalui sebuah saluran tertutup selalu mengalami *pressure drop* yang diakibatkan oleh gesekan antara fluida dengan dinding saluran, dalam hal ini saluran berbentuk pipa dengan material galvanis. Disamping dipengaruhi oleh material pipa, *pressure drop* yang terjadi juga diakibatkan oleh fenomena *secondary flow* dan separasi aliran yang terjadi karena adanya suatu gangguan dalam pipa berupa *elbow* dan *butterfly valve*. Pada penelitian yang dilakukan oleh **Danbon** dan **Sollic** (2000) dengan penempatan *valve* secara vertikal diperoleh hasil bahwa *elbow* dan *butterfly valve* sangat mempengaruhi profil kecepatan aliran pada sisi *downstream* hingga posisi $x/D=11$ belum *recovery*. Dalam penelitian ini dilakukan modifikasi arah bukaan *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal (tegak lurus terhadap sumbu *elbow*) dengan harapan dapat mengurangi *blockage effect* yang ditimbulkan oleh perbedaan kecepatan pada sisi *inner* dan *outer elbow* ketika aliran melewati *valve*, sehingga profil kecepatan dapat *recovery* lebih cepat dan *pressure losses* yang ditimbulkan lebih kecil.

1.3. Batasan Masalah

Untuk memperoleh hasil penelitian yang baik, maka dalam penelitian ini diberikan beberapa pembatasan dan asumsi agar penelitian tidak melebar dan lebih terfokus, antara lain :

- Penempatan *elbow* pada sumbu Z, digunakan sebagai datum untuk penempatan sumbu *valve*
- Fluida kerja berupa udara sebagai *incompressible flow* dengan densitas (ρ) dan viskositas dinamik (μ) konstan pada kondisi STP
- Aliran udara pada sisi *inlet* diasumsikan sebagai aliran yang seragam dan *steady*
- Perpindahan panas yang terjadi dalam sistem diabaikan
- Simulasi dilakukan dengan bantuan perangkat lunak CAD dan CFD komersial.

1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini secara umum bertujuan untuk mengetahui karakteristik aliran yang melewati *elbow* dan *butterfly valve* secara numerik untuk melengkapi eksperimen yang telah dilakukan sebelumnya, secara khusus penelitian ini bertujuan sebagai berikut :

- a. Secara kuantitatif bertujuan untuk menganalisis grafik perubahan tekanan dan profil kecepatan aliran yang diakibatkan oleh *elbow* dan *butterfly valve*
- b. Secara kualitatif bertujuan untuk menganalisis perilaku aliran melalui kontur kecepatan dan kontur tekanan, disamping itu juga melalui vektor kecepatan aliran.

1.5. Manfaat Penelitian

Dalam penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut :

- a. Memberikan pemahaman mengenai aliran dalam pipa yang melewati *elbow* 90° dan *butterfly valve*
- b. Memberikan pemahaman mengenai model turbulen yang sesuai untuk menganalisa aliran dalam pipa yang melewati *elbow* 90°
- c. Memberikan pemahaman mengenai arah bukaan *butterfly valve* yang efektif untuk aliran yang melewati *elbow* sebagai *upstreamnya*

1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam penelitian ini disusun sebagai berikut :

BAB 1 Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, dan manfaat dari penelitian yang dilakukan.

BAB 2 Tinjauan Pustaka

Bab ini dibagi menjadi 3 bagian, yaitu dasar teori aliran dalam pipa, CFD (*computational fluid dynamic*), dan penelitian terkait yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang menunjang dalam penganalisaan hasil penelitian. Sedangkan penelitian terkait yang sudah ada berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang relevan dengan penelitian ini dan sebagai penunjang dalam analisa data.

Bab 3 Metode Penelitian

Bab ini menerangkan tentang langkah-langkah pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak CAD dan CFD komersial, geometri dari pipa, *elbow* dan *valve*, serta alokasi waktu penelitian.

Bab 4 Hasil dan Pembahasan

Dalam bab ini akan dibahas mengenai pengujian model turbulen yang sesuai, karakteristik aliran meliputi profil dan vektor kecepatan, koefisien *losses*, pengaruh bilangan Reynolds terhadap profil aliran, pengaruh arah bukaan valve terhadap karakteristik aliran, dan perbandingan antara simulasi yang telah dilakukan dengan data eksperimen.

Bab 5 Kesimpulan dan Saran

Analisa yang telah dilakukan pada bab sebelumnya akan diambil kesimpulan pada bab ini menerangkan hal-hal yang dapat dilakukan perbaikan dalam penelitian selanjutnya.

BAB 2

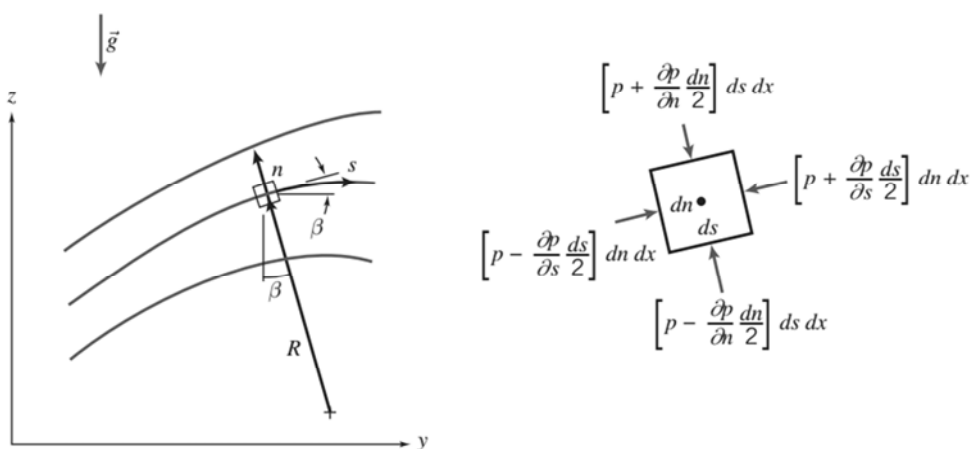
KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1. Aliran Dalam Pipa

Berdasarkan permasalahan yang telah dikemukakan dalam bab sebelumnya, maka untuk mencapai hasil yang diharapkan akan dilakukan studi secara numerik berdasarkan teori yang relevan dan penelitian-penelitian sebelumnya yang akan dibahas dalam bab 2 ini.

2.1.1 Persamaan Euler dalam Koordinat *Streamline*

Dalam aliran yang *steady* partikel dari fluida akan bergerak sepanjang arah alirannya dikarenakan arah aliran dan jalurnya adalah sama. Untuk mendefinisikan pergerakan partikel fluida dalam aliran tunak menggunakan koordinat x , y , dan z . Jarak pada suatu arah alirannya merupakan koordinat yang digunakan untuk menuliskan persamaan geraknya. Koordinat arah aliran juga dimungkinkan untuk digunakan dalam mendeskripsikan aliran *unsteady*. Arah aliran dalam aliran *unsteady* memberikan gambaran secara grafis dari kecepatan sesaat. Dari persamaan Euler dibangun persamaan gerak yang dinyatakan dalam koordinat *streamline* untuk *inviscid flow*, dengan mengabaikan *body forces* dapat dinyatakan dalam persamaan (2.1) dan diilustrasikan dalam Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Gerakan fluida dalam sebuah *streamline* (Fox, 2010)

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} = -V \frac{\partial V}{\partial s} \quad (2.1)$$

Persamaan (2.1) menunjukkan keterkaitan antara kecepatan dengan tekanan yang linier, yaitu apabila terjadi penurunan kecepatan terjadi peningkatan pada tekanan dan sebaliknya. Hal ini sesuai dengan hukum kekekalan energi, yaitu penjumlahan dari komponen tekanan dan kecepatan pada suatu titik adalah sama.

Untuk aliran dalam bidang horizontal, persamaan Euler dari sebuah aliran ke arah n dinyatakan dalam persamaan (2.2)

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{V^2}{R} \quad (2.2)$$

Persamaan (2.2) menunjukkan terjadinya peningkatan tekanan ke arah luar dari radius arah alirannya dikarenakan pada partikel fluida hanya terpengaruh gaya dari tekanan. Gaya ini menyebabkan akselerasi sentripetal, sedangkan untuk arah aliran dengan radius tak hingga atau lurus tidak terdapat perbedaan tekanan normal terhadap arah alirannya.

2.1.2 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida, dimana bilangan ini menyatakan perbandingan rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous*. Bilangan Reynolds yang tinggi (>4000) menunjukkan dalam sebuah aliran didominasi oleh gaya inersia dibandingkan dengan gaya *viscous*-nya, sedangkan apabila dalam sebuah aliran gaya *viscous* lebih mendominasi dibandingkan dengan gaya inersianya, maka bilangan Reynolds yang terbentuk cukup rendah (<1). Sehingga bilangan Reynolds merupakan salah satu indikasi terjadinya aliran, semakin besar bilangan Reynolds maka aliran akan semakin turbulen. Bilangan Reynolds dapat dihitung dengan persamaan 2.3, pada aliran dalam pipa maupun *duct*, dibagi tiga zona aliran berdasarkan bilangan Reynoldsnya, yaitu :

1. Laminar, yaitu aliran dengan bilangan Reynolds < 2100
2. Transisi, yaitu aliran dengan bilangan Reynolds antara $2100 - 4000$
3. Turbulen, yaitu aliran dengan bilangan Reynolds > 4000

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \dots\dots\dots (2.3)$$

Re = Bilangan Reynolds

ρ = densitas (kg/m^3)

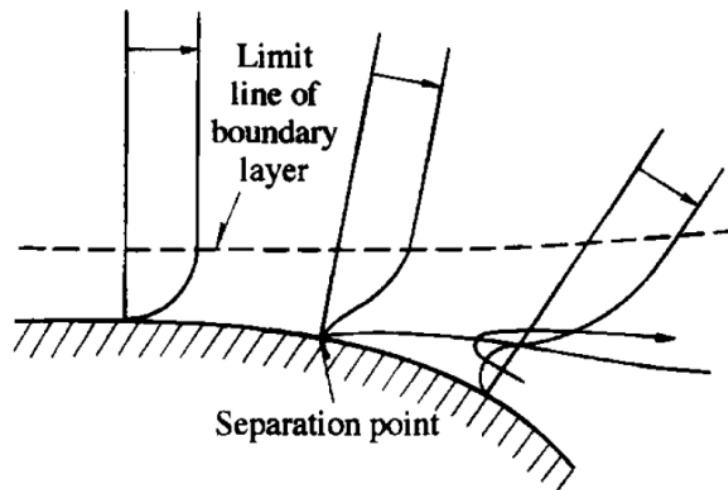
U = Kecepatan aliran (m/s)

D_h = Diameter hidrolik (m)

μ = viskositas kinematis fluida (kg/ms)

2.1.3 Separasi Aliran

Pada suatu aliran fluida yang mengalami penurunan tekanan searah dengan arah aliran mengakibatkan fluida mengalami percepatan dan penipisan lapisan batas. Gradien tekanan negatif dalam suatu saluran yang mengalami kontraksi dapat membuat aliran stabil sementara itu turbulensi secara bertahap menurun. Sebaliknya, hal-hal yang sangat berbeda dalam aliran yang memiliki gradien tekanan yang positif dimana tekanan meningkat searah dengan arah aliran, seperti pada aliran *divergen* atau aliran pada dinding yang melengkung seperti pada Gambar 2.2.



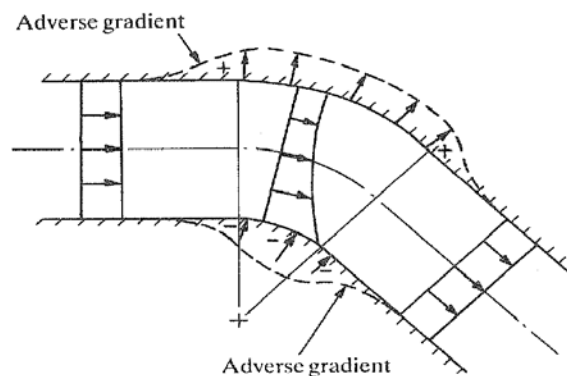
Gambar 2.2 Separasi lapisan batas

Pada Gambar 2.2, terlihat bahwa fluida yang berjarak cukup jauh dari dinding memiliki kecepatan yang tinggi dan juga inersia yang besar. Oleh karena itu, aliran dapat melanjutkan ke arah *downstream* dan mampu untuk menghadapi tekanan *downstream* yang tinggi. Sedangkan fluida yang berdekatan dengan dinding memiliki kecepatan yang rendah, sehingga tidak dapat mengatasi tekanan untuk mencapai *downstream* karena hanya memiliki inersia yang kecil pula. Dengan demikian kecepatan aliran menjadi semakin kecil hingga pada akhirnya gradien kecepatannya menjadi nol, titik ini disebut sebagai titik separasi.

Setelah terjadinya separasi, gradien kecepatan menjadi negatif sehingga menghasilkan aliran balik (*backflow*). Dalam area sekitar titik separasi, suatu vortisitas akan berkembang dan aliran akan menjadi turbulen. Berkembangnya vortisitas menyebabkan terbentuknya *vortex*, adanya *vortex region* akan mengurangi luas penampang efektif yang dilalui aliran utama, sehingga aliran mengalami percepatan, akibatnya akan terjadi *pressure drop*. Untuk alasan ini, kerugian energi menjadi meningkat.

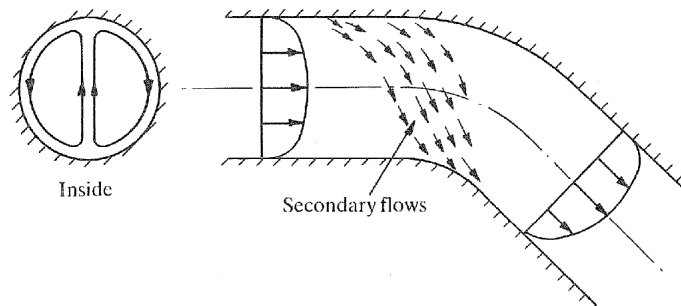
2.1.4 Aliran Sekunder

Aliran yang melalui *elbow* tentunya akan berubah arah, begitu pula dengan tekanan statis dan distribusi kecepatannya pun akan ikut berubah, setidaknya ada dua *adverse pressure gradient* akan timbul seperti yang terlihat pada Gambar 2.3. Setelah itu aliran sekunder akan muncul dan menyebabkan turbulensi pada struktur aliran.



Gambar 2.3 Aliran ideal melalui belokan (Miller, 1990)

Pada *elbow*, kecepatan bervariasi dari nol pada dinding hingga maksimum pada daerah inti, aliran aktual melalui *elbow* melibatkan distribusi energi yang tidak seragam. Perbedaan distribusi ini terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*, hal ini terjadi karena semakin mendekati sisi luar maka tekanan statis akan semakin besar. Perbedaan tekanan pada kedua sisi inilah yang menyebabkan aliran yang melewati *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama. Aliran sekunder ini merupakan fenomena aliran tiga dimensi seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Aliran sekunder (Miller, 1990)

Namun lain halnya dengan aliran sekunder yang terjadi pada *square elbow*. Pada *square elbow* mempunyai karakter khusus jika dibandingkan *circular elbow* dengan terjadinya aliran sekunder pada sisi sudut. Aliran sekunder terjadi karena pada *square elbow* terjadi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping sedangkan pada *circular elbow* tidak dijumpai. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi bawah dan samping inilah yang menyebabkan terjadinya aliran sekunder.

2.1.5 Pressure Drop

Pressure drop dapat dinyatakan dengan dengan *Pressure Losses Coefficient*, yaitu suatu bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menyatakan besarnya tekanan statis yang hilang selama aliran melewati kanal tertentu per satuan tekanan dinamis yang dimiliki oleh aliran tersebut seperti dinyatakan dalam persamaan 2.3. Nilai dari *pressure losses coefficient* sebanding

dengan penurunan tekanan pada dua titik tertentu dan berbanding terbalik dengan tekanan dinamis yang dimiliki oleh aliran tersebut.

Perubahan nilai *pressure losses coefficient* pada aliran yang melewati *butterfly valve* tidak berbanding lurus dengan besar sudut bukaan *valve*, namun peningkatan *pressure losses coefficient* akan lebih besar pada *valve* yang dibuka dengan sudut lebih dari 70° seperti yang dinyatakan oleh **Kimura, dkk** (1995). Hal ini tidak hanya disebabkan oleh penurunan luas area yang dilewati oleh aliran, tetapi juga dikarenakan terjadinya efek *nozzle* dan *diffuser* sehingga aliran berekspansi secara mendadak setelah melewati *valve*.

$$K = \frac{p - p_{\infty}}{\frac{1}{2}\rho U^2} \dots\dots\dots(2.4)$$

- K = *Pressure losses coefficient*
- p = Tekanan pada titik titik tertentu
- p_∞ = Tekanan *free stream*
- ρ = Massa jenis fluida
- U = Kecepatan *free stream*

2.2. CFD (Computational Fluid Dynamics)

CFD merupakan akronim dari *Computational Fluid Dynamic*, secara etimologi berarti komputasi atau perhitungan secara numerik atau matematis untuk segala sesuatu yang berhubungan dinamika fluida yang mengalir. Secara definisi CFD adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika (model matematika).

Pada dasarnya, persamaan-persamaan pada fluida dibangun dan dianalisis berdasarkan persamaan-persamaan diferensial parsial (PDE = *Partial Differential Equation*) yang merepresentasikan hukum-hukum konservasi massa, momentum, dan energi. Sebenarnya CFD mengganti persamaan-persamaan differensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi dengan persamaan-persamaan aljabar. CFD merupakan pendekatan dari persoalan yang asalnya

kontinum (memiliki jumlah sel tak terhingga) menjadi model yang diskrit (jumlah sel tertentu). Jadi CFD memprediksi aliran berdasarkan :

- Model matematika (persamaan diferensial parsial), khususnya memecahkan persamaan Navier-Stokes.
- Metode numerik (teknik solusi dan diskritisasi)
- Tools perangkat lunak (solvers, tools preprocessing, dan postprocessing)

2.2.1. Karakteristik CFD

Penggunaan metode CFD untuk memprediksi aliran fluida maupun perpindahan panas dengan menyelesaikan persamaan-persamaan matematika memiliki kelebihan dan kekurangan bila dibandingkan dengan metode penelitian lainnya seperti eksperimen. diantara kelebihan dan kekurangan tersebut adalah sebagai berikut :

Kelebihan CFD

Beberapa keuntungan yang dapat kita peroleh dari penggunaan CFD antara lain :

1. Biaya yang dikeluarkan relatif kecil karena tidak memerlukan pembuatan model dari obyek penelitian, biaya ini semakin menurun dengan semakin menurunnya harga komputer
2. Kecepatan, simulasi secara CFD dapat dilakukan dalam waktu yang singkat dan data dapat diperoleh lebih awal dalam proses mendesain sebuah produk
3. Kemampuan untuk mensimulasikan kondisi sesuai kenyataan
4. Kemampuan untuk mensimulasikan sesuai kondisi ideal
5. Memberikan data secara komprehensif, dengan CFD peneliti dapat mengambil data disemua titik dari geometri, sedangkan pada eksperimen titik pengambilan data terbatas.

Kekurangan CFD

Disamping memiliki beberapa keuntungan, CFD juga memiliki keterbatasan sebagai berikut :

1. CFD mengandalkan model fisik dari proses dunia nyata, seperti model turbulen, multiphase, dll, dimana solusi hanya bisa akurat sesuai dengan model yang dideskripsikan

2. Kesalahan numerik, seperti kesalahan dalam pembulatan dan pemotongan *grid*
3. Seperti pada model fisik, akurasi solusi CFD tergantung pada kondisi batas yang digunakan pada model numerik

2.2.2. Langkah-Langkah Simulasi CFD

Untuk melakukan simulasi secara CFD pada dasarnya diperlukan 3 tahapan, yaitu *pre processing*, *solving*, dan *post processing*. Penjelasan untuk setiap tahapan sebagai berikut :

1. Pre processing

Tahapan ini merupakan langkah pertama dalam melakukan simulasi secara CFD, yang dimulai dengan membuat model dari geometri yang disimulasikan dengan bantuan perangkat lunak CAD (*Computer Aided Design*), selanjutnya membagi geometri menjadi bagian-bagian kecil dengan *mesh* yang sesuai, selanjutnya memberikan kondisi batas pada geometri dan sifat-sifat dari fluida kerja yang digunakan

2. Solving

Pada tahapan ini perangkat lunak *solver* menghitung persamaan-persamaan yang diaplikasikan terhadap kondisi-kondisi yang telah didefinisikan sebelumnya pada tahap *pre processing*

3. Post Processing

Tahapan terakhir dalam proses simulasi CFD adalah *post processing*, dimana pada tahap ini dilakukan pengambilan dan interpretasi data dari perhitungan tahap sebelumnya. Data yang bisa diambil dapat berupa grafik, kontur, gambar, kurva, maupun animasi.

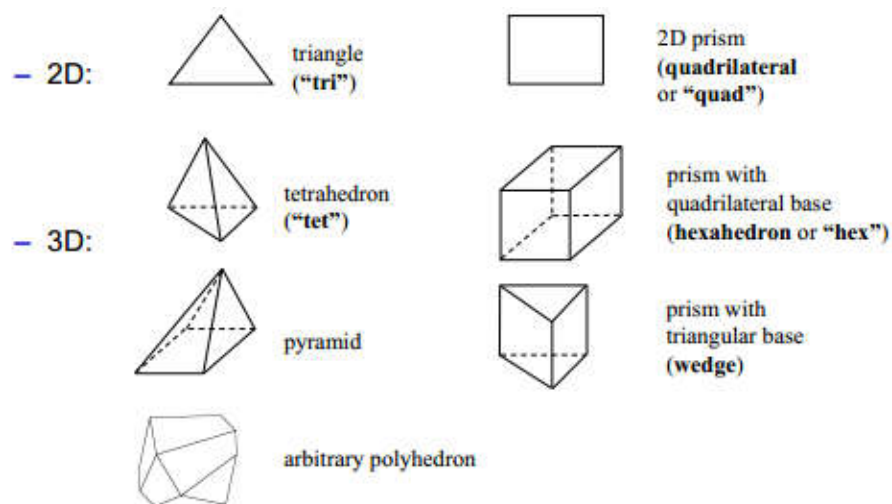
2.2.3. Mesh

Untuk menyelesaikan persamaan-persamaan dalam CFD, geometri yang telah dibuat perlu dilakukan diskritisasi menjadi bagian-bagian kecil yang merepresentasikan geometri yang akan diselesaikan. Pada bagian sel akan membentuk daerah yang menjadi kondisi batas. *Mesh* memiliki peranan penting dalam CFD terhadap keakuratan simulasi, tingkat konvergen, maupun lama waktu

perhitungan. Hal-hal yang mempengaruhi kualitas mesh antara lain sebagai berikut :

- Kerapatan *mesh*
- Ratio dari volume *mesh* yang berdekatan
- Skewness
- Bentuk *mesh*
- Boundary layer mesh

Pemilihan jenis *mesh* bergantung pada kompleksitas geometri yang akan dianalisa, namun secara umum biasanya digunakan jenis *triangle* atau *quad* untuk 2D, dan tetrahedral atau hexahedral untuk 3D, untuk lebih jelasnya ditampilkan dalam Gambar 2.5



Gambar 2.5 Berbagai jenis bentuk *mesh*

2.2.4. Kondisi Batas

Untuk menganalisa sebuah geometri yang sudah dibagi menjadi *mesh* diperlukan definisi kondisi batas untuk setiap bagian yang berbeda, diantara beberapa kondisi batas yang tersedia dalam perangkat lunak CFD komersial sebagai berikut :

- ***Velocity inlet***, kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran fluida yang masuk pada sisi *inlet*, beserta dengan properti skalarnya yang relevan. Kondisi batas ini dimaksudkan untuk aliran *incompressible*.

- **Pressure inlet**, kondisi batas ini biasa digunakan untuk mendefinisikan tekanan fluida pada aliran pada *inlet*, beserta dengan seluruh properti aliran lainnya. Kondisi batas ini sesuai untuk perhitungan aliran *incompressible* maupun *compressible*. Kondisi batas *pressure inlet* dapat digunakan ketika tekanan *inlet* diketahui namun laju aliran tidak diketahui. Situasi ini muncul dalam banyak situasi, termasuk aliran *bouyancy-driven*.
- **Mass flow inlet**, kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan laju aliran massa yang telah dirumuskan atau distribusi fluks massa pada *inlet*. Secara fisik, menentukan fluks massa memungkinkan tekanan total bervariasi dalam menanggapi solusi interior. Hal ini berbeda dengan kondisi batas *pressure inlet*, dimana tekanan total adalah tetap sedangkan fluks massa bervariasi.
- **Pressure outlet**, kondisi batas ini membutuhkan spesifikasi dari tekanan statis (*gauge*) pada *outlet boundary*. Nilai dari tekanan statis yang telah ditentukan digunakan hanya ketika bekerja pada aliran *subsonic*, tekanan yang telah ditentukan tidak akan lagi digunakan, tekanan akan diekstrapolasikan dari aliran dalam interior. Seluruh kuantitas aliran lainnya diekstrapolasikan dari interior.
- **Outflow**, kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan aliran dimana pada *outlet*-nya kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui pada kondisi awal. Kondisi batas ini tidak dapat digunakan dalam kasus aliran *compressible*, aliran *unsteady* dengan densitas bervariasi meskipun merupakan aliran *incompressible*, dan masalah yang melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.
- **Wall**, kondisi batas yang digunakan untuk mendefinisikan sebuah garis atau permukaan sebagai dinding pembatas dari fluida maupun suatu daerah solid. Pada kondisi batas ini dapat dimasukkan properti seperti kekasaran, temperatur, *shear*, dan kecepatan apabila wall bergerak.
- **Interface**, kondisi batas ini digunakan untuk memisahkan zona solid, namun fluida tetap dapat mengalir melewati kondisi batas ini.

2.2.5. *Grid Independensi*

Grid independensi dilakukan untuk mengeliminasi atau mengurangi pengaruh dari jumlah dan ukuran *mesh* terhadap hasil perhitungan, langkah ini dilakukan untuk memperoleh jumlah *mesh* sekecil mungkin namun dengan hasil atau tingkat kesalahan yang masih dapat diterima. Jumlah *mesh* yang kecil akan berdampak pada waktu dan tingkat konvergensi perhitungan. *Grid* independensi dilakukan dengan membandingkan hasil dari beberapa perhitungan yang memiliki parameter yang sama selain pada jumlah *mesh*. Jumlah *mesh* yang akan dipilih adalah ketika tidak terdapat perbedaan suatu parameter yang signifikan dengan domain yang memiliki jumlah *mesh* lebih banyak, maka jumlah tersebut dianggap sudah optimal.

2.2.6. **Model Turbulen**

Karakteristik aliran turbulen disebabkan oleh fluktuasi pada bidang kecepatan, yang bercampur dengan properti dalam aliran seperti momentum, energi, dan konsentrasi spesies. Fluktuasi terjadi dalam skala yang sangat kecil dan frekuensinya tinggi, sehingga terlalu kompleks untuk mensimulasikannya secara langsung dalam perhitungan teknik. Sehingga pada perangkat lunak CFD komersial menyediakan berbagai model turbulen yang dapat digunakan pada kasus yang sesuai, beberapa model turbulen tersebut antara lain :

- $k-\varepsilon$ (k-epsilon)

Model $k-\varepsilon$ merupakan model turbulen yang menggunakan dua persamaan, sehingga memungkinkan kecepatan turbulen dan skala panjang ditentukan secara independen. Model $k-\varepsilon$ difokuskan untuk mekanisme yang memberikan efek perubahan terhadap energi kinetik turbulen (per satuan massa) k , dan ε merupakan laju disipasi dari k .

- Standar $k-\varepsilon$

Model ini adalah dasar untuk menyelesaikan persamaan k dan ε , dimana koefisien-koefisien yang digunakan sudah diturunkan secara empiris, model ini hanya sesuai untuk aliran turbulen penuh.

- Renormalization-group (RNG) $k-\epsilon$

Salah satu varian dari model $k-\epsilon$ dimana persamaan dan koefisien diturunkan secara analitis, perubahan yang signifikan pada model turbulen ini yaitu kemampuan untuk memodelkan aliran yang memiliki efek *swirling*. Model ini lebih akurat untuk aliran dengan bilangan Reynolds rendah.

- Realizable $k-\epsilon$

Model ini berisi persamaan yang baru dan berbeda dari dua varian model $k-\epsilon$ sebelumnya untuk menyelesaikan viskositas turbulen, dimana persamaan untuk laju disipasi ϵ diturunkan dari persamaan eksak untuk memprediksi fluktuasi dari rata-rata vortisiti. Dengan menggunakan model ini dapat memberikan performa yang baik untuk aliran yang melibatkan pusaran, separasi, *recirculation*, dan lapisan batas yang mempunyai gradien tekanan yang besar.

- $k-\omega$

Model ini termasuk model yang menggunakan dua persamaan dalam pemodelannya. Kedua persamaan dimodifikasi untuk kasus dengan bilangan Reynolds rendah, *compressibility*, dan *shear flow spreading*.

- Standar $k-\omega$

Model turbulen ini memiliki karakteristik yang baik untuk aliran dengan bilangan Reynolds rendah yang berada didalam pipa maupun *duct*. Model ini dapat menampilkan transisi aliran dari yang awalnya laminar menjadi turbulen. Model ini juga dapat pula menghitung *free shear* dan aliran *compressible*.

- Shear-stress transport (SST) $k-\omega$

Model ini merupakan variasi dari model *standard k- ω* yang dikembangkan untuk memadukan formulasi model *standard k- ω* yang stabil dan akurat pada daerah di dekat dinding dengan model *k- ω* yang memiliki keunggulan dalam aliran *free stream*.

2.3. Penelitian Terdahulu

Penelitian-penelitian sebelumnya terkait dengan aliran melewati *elbow* dan *butterfly valve* yang telah dilakukan sebelumnya oleh beberapa peneliti dengan metode CFD maupun eksperimen yang ditampilkan dalam Tabel 2.1

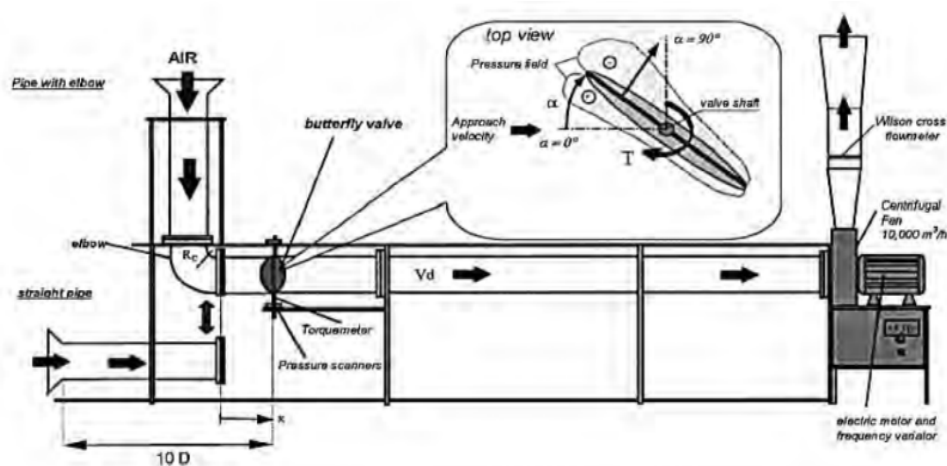
Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

| No. | Nama Peneliti | Tahun | Metode | Hasil Penelitian |
|-----|---------------------|-------|--------------------|---|
| 1. | Danbon dan Sollicc. | 2000 | Eksperimen | <ul style="list-style-type: none">– <i>Elbow</i> mempengaruhi profil kecepatan pada <i>downstream</i> hingga 8D– <i>Butterfly valve</i> memperlambat profil kecepatan untuk kembali ke normal (<i>recovery</i>) |
| 3. | Kim, dkk | 2013 | CFD | <ul style="list-style-type: none">– Intensitas aliran <i>swirl</i> menurun secara eksponensial setelah melewati <i>elbow</i>– Laju disipasi lebih cepat pada radius <i>elbow</i> yang lebih besar |
| 3. | Kim, dkk | 2007 | Eksperimen dan CFD | <ul style="list-style-type: none">– Terjadi <i>reattached</i> dan <i>recirculation flow</i> pada <i>downstream</i> dengan bukaan <i>valve</i> 30° – 70°– <i>Uniform flow</i> baru terjadi pada bukaan <i>valve</i> 90° (terbuka penuh)– Koefisien <i>pressure losses</i> semakin menurun seiring dengan semakin besar bukaan <i>valve</i> |

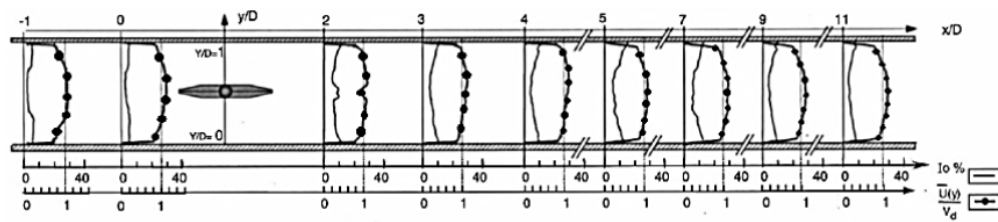
| No. | Nama Peneliti | Tahun | Metode | Hasil Penelitian |
|-----|-------------------------|-------|--------|---|
| 4. | Dawy, dkk | 2013 | CFD | <ul style="list-style-type: none"> - Separasi aliran dan <i>vortex</i> yang terjadi pada <i>downstream</i> semakin meningkat seiring dengan bertambahnya sudut bukaan <i>valve</i> - <i>Pressure drop</i> dan koefisien aliran melewati <i>valve</i> bergantung pada sudut bukaan <i>valve</i> |
| 5. | Hosseini, dkk | 2011 | CFD | <ul style="list-style-type: none"> - Separasi aliran terjadi pada bukaan <i>valve</i> $>20^\circ$, separasi terbesar terjadi pada sudut 45° - Koefisien <i>losses</i> berhubungan langsung dengan sudut bukaan <i>valve</i>, semakin besar bukaan semakin kecil koefisien <i>losses</i>. |
| 6. | Dutta, P. dan Nandi, N. | 2015 | CFD | <ul style="list-style-type: none"> - Bilangan Reynolds tidak berpengaruh terhadap kecepatan rata-rata dan profil kecepatan pada <i>elbow</i> dengan radius kecil. - Aliran setelah melewati <i>elbow</i> lebih cepat <i>recovery</i> pada radius <i>elbow</i> yang lebih besar. - <i>Secondary flow</i> terjadi lebih kuat pada <i>elbow</i> dengan radius yang lebih kecil dan hampir tidak terpengaruh oleh bilangan Reynolds. |

| No. | Nama Peneliti | Tahun | Metode | Hasil Penelitian |
|-----|----------------|-------|------------|---|
| 7. | Kimura, dkk | 1995 | Eksperimen | – Peningkatan <i>pressure losses coefficient</i> tidak linier terhadap bukaan <i>valve</i> , semakin kecil bukaan <i>valve</i> maka peningkatan <i>pressure losses coefficient</i> semakin besar, terutama pada <i>valve</i> yang dibuka kurang dari 70°. |

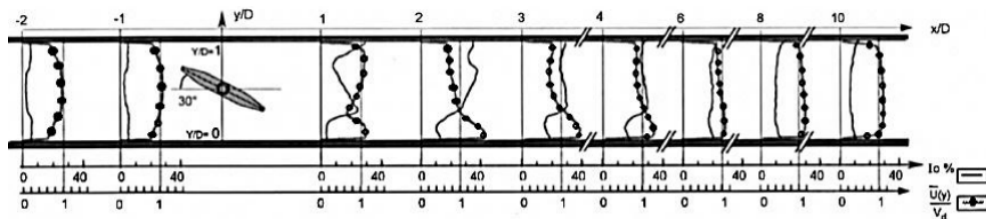
Danbon dan Sollicc (2000) melakukan eksperimen pada pipa yang dilengkapi dengan *elbow* 90° dan *butterfly valve* terletak pada $x/D=1$ dengan sudut bukaan 0° dan 30° pada *downstream* untuk mengatur laju aliran massa. Penelitian dilakukan secara eksperimen pada *wind tunnel* yang ditampilkan dalam Gambar 2.6 dengan kecepatan aliran pada *inlet* 40 m/s dan intensitas turbulen 2%. Hasil penelitian yang diperoleh adalah profil kecepatan pada zona *downstream* seperti dalam Gambar 2.7 sampai Gambar 2.10.



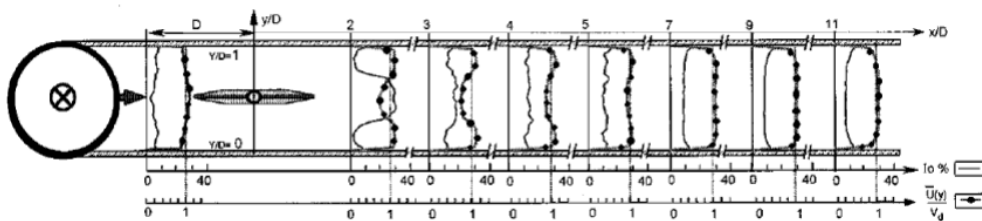
Gambar 2.6 Skema pengujian



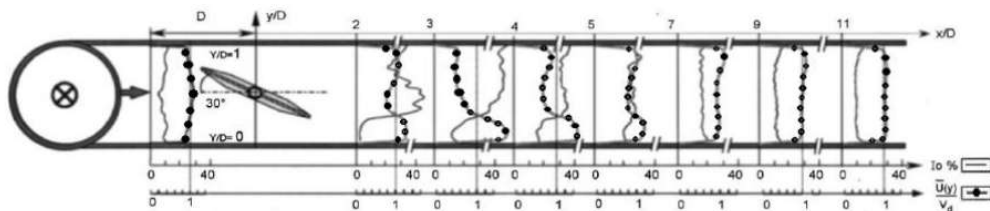
Gambar 2.7 Profil kecepatan pada pipa tanpa *elbow* dan sudut bukaan *valve* 0°



Gambar 2.8 Profil kecepatan pada pipa tanpa *elbow* dan sudut bukaan *valve* 30°



Gambar 2.9 Profil kecepatan pada pipa dengan *elbow* 90° dan sudut bukaan *valve* 0°

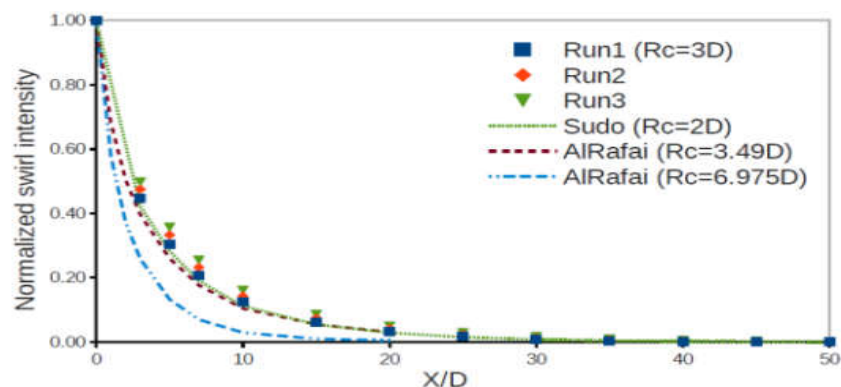


Gambar 2.10 Profil kecepatan pada pipa dengan *elbow* 90° dan sudut bukaan *valve* 30°

Pada Gambar 2.7 *valve* dipasang dengan sudut bukaan 0° pada pipa lurus tanpa *elbow* terlihat perubahan profil kecepatan sesaat setelah melewati *valve* namun segera kembali ke profil normal pada $x/D=5$, hal ini berbeda dengan Gambar 2.9 dimana *valve* dipasang setelah *elbow*, aliran terpengaruh oleh akselerasi yang ditimbulkan oleh *elbow* sehingga profil kecepatan aliran baru kembali pada $x/D=8$.

Ketika *valve* dibuka pada sudut 30° seperti dalam Gambar 2.8 dan Gambar 2.10 terlihat perbedaan profil kecepatan dimana aliran pada pipa tanpa *elbow* profil kecepatan dapat kembali normal lebih cepat dibanding pada aliran yang melewati *elbow*. Hal ini disebabkan karena pada saluran yang terpasang *elbow* sudah mengalami gangguan akibat aliran sekunder di dalamnya, kemudian sesaat setelah melewati *elbow* terdapat *blockage effect* berupa *valve* sehingga seolah-olah gangguan tersebut terakumulasi akibatnya aliran tertunda mencapai *fully recovery*. Secara keseluruhan, untuk aliran yang melalui *valve* dengan bukaan 30° profil kecepatannya akan lebih lambat kembali normal dari pada *valve* dengan bukaan 0° , hal ini disebabkan oleh *blockage effect* yang lebih besar akan memberikan momentum tambahan untuk melawan gaya gesernya.

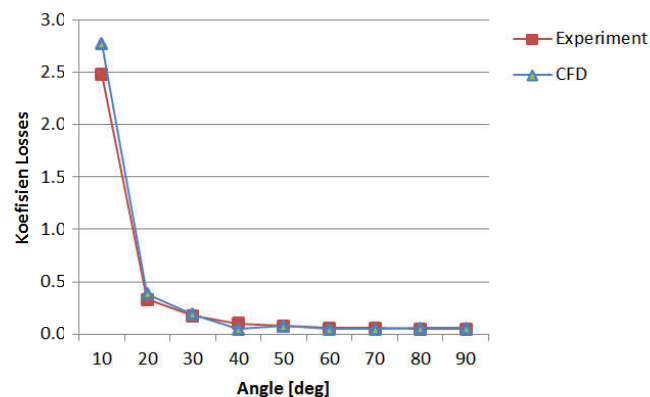
Kim, dkk (2013) melakukan penelitian secara CFD dengan perangkat lunak OpenFOAM, analisis dilakukan dengan membandingkan berbagai jenis model turbulen dengan data eksperimen untuk memperoleh model turbulen yang sesuai. Geometri yang digunakan adalah pipa dengan *upstream* 20D dan *downstream* 50D yang dihubungkan oleh *elbow* 90° dengan radius 3D, analisa dilakukan dengan diskritisasi *finite volume method* SIMPLE dan model turbulen k- ϵ RNG dengan kecepatan pada *inlet* sebesar 1, 2, dan 4m/s. Dalam penelitian ini diperoleh hasil dimana intensitas aliran *swirl* menurun secara eksponensial setelah melewati *elbow* yang ditampilkan dalam Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Grafik intensitas aliran *swirl*

Kim, dkk (2007) melakukan penelitian terhadap *butterfly valve* secara eksperimen dan CFD kemudian membandingkan hasil keduanya untuk mengetahui karakteristik dari *butterfly valve*. Eksperimen dilakukan pada pipa berdiameter 80mm dengan panjang *upstream* dan *downstream* masing-masing 5D dan 10D, laju aliran massa dari air yang mengalir diukur dengan *flowmeter* magnetik. Pengambilan data dibantu dengan kamera CCD berkecepatan tinggi dan sebuah laser *sheet*. Untuk metode CFD digunakan bentuk dan dimensi geometri yang sama dengan eksperimen dan dibagi-bagi menjadi 400.000 sel *mesh* dengan jenis hex-tetra-prism. Turbulen model yang digunakan adalah k- ω SST dengan kecepatan aliran air pada *inlet* 0,5 – 3,6 m/s.

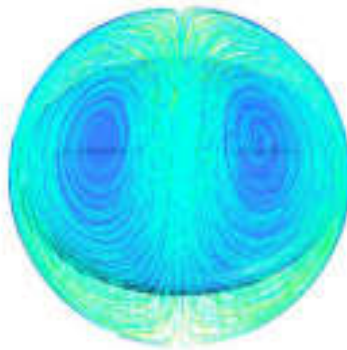
Perbandingan hasil kedua metode penelitian menunjukkan vektor kecepatan dan energi kinetiknya memiliki pola yang sama, dimana aliran secara intensif mulai nampak pada sudut bukaan *valve* 10° dengan *pressure losses* cukup tinggi, pada sudut 20° *pressure losses* turun secara drastis dan mulai mendekati nol pada bukaan *valve* 50° seperti dalam Gambar 2.12.



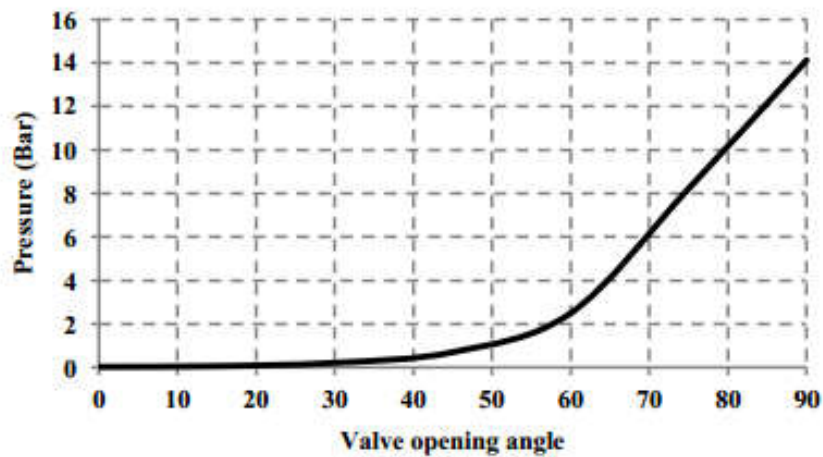
Gambar 2.12 Perbandingan koefisien *pressure losses*

Dawy, dkk (2013) melakukan investigasi pada *butterfly valve* berdiameter 50 mm yang dialiri udara *incompressible* dengan kecepatan 5 m/s pada pipa berdiameter 52 mm dengan panjang *upstream* dan *downstream* masing-masing 2D dan 15D terhadap *diameter valve*. Penelitian secara CFD ini menggunakan *mesh* berbentuk tetrahedral dan model turbulen k- ϵ standar, dengan variasi bukaan *valve* 10, 15, 30, 45, 60, dan 75 derajat.

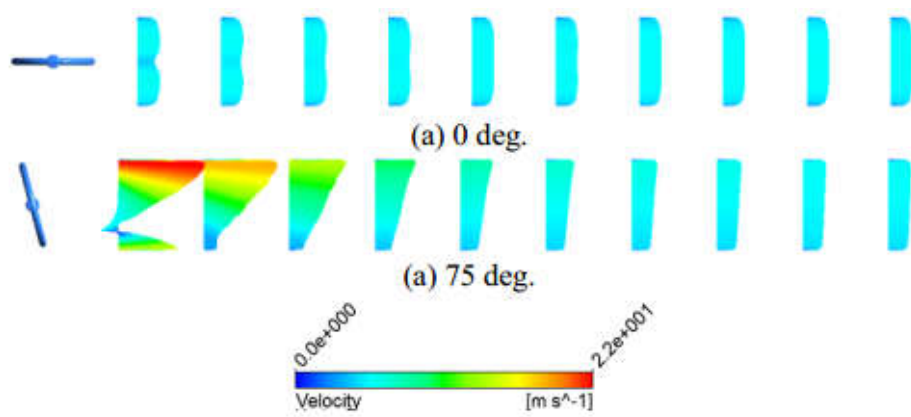
Pada semua sudut variasi sudut bukaan *valve* ditemui aliran *swirling* pada *downstream valve* secara langsung seperti dalam Gambar 2.13. Pada keadaan *valve* terbuka penuh aliran terlihat halus dengan zona separasi yang sangat kecil nampak pada *trailing edge valve*, seiring meningkatnya sudut bukaan *valve*, aliran menjadi semakin turbulen dan separasi meningkat hingga seluruh permukaan *valve* pada sudut 45° . Fenomena ini mengakibatkan *pressure drop* seperti dalam Gambar 2.14. Profil kecepatan pada aliran sebelum melewati *valve* adalah aliran seragam, namun setelah melewati *valve* profil kecepatan berubah dan kembali normal pada *downstream* 8D hingga 10D seperti dalam Gambar 2.15.



Gambar 2.13 Aliran *swirling* pada *valve*



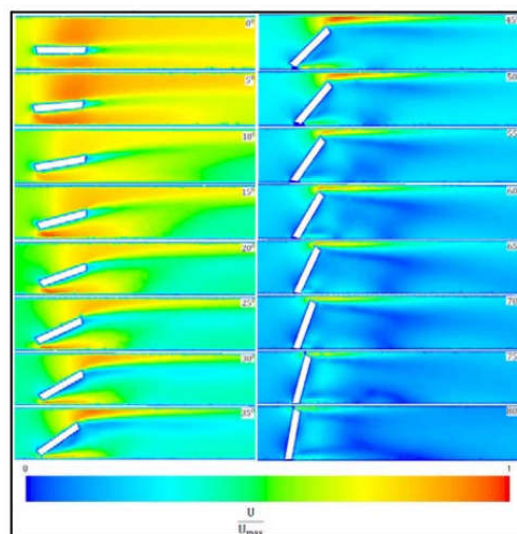
Gambar 2.14 Grafik *pressure drop*



Gambar 2.15 Profil kecepatan pada *downstream* dengan bukaan *valve* 0° dan 75°

Hosseini, dkk (2012) melalui penelitian secara numeriknya pada *butterfly valve* berdiameter 262 mm dengan sudut bukaan mulai 0° hingga 80° dengan interval 5°. *Upstream* dan *downstream* memiliki panjang masing-masing 2D dan 10D, model turbulen yang digunakan adalah k- ϵ standar dengan *standard wall function* dengan tekanan pada *inlet* sebesar 16 bar.

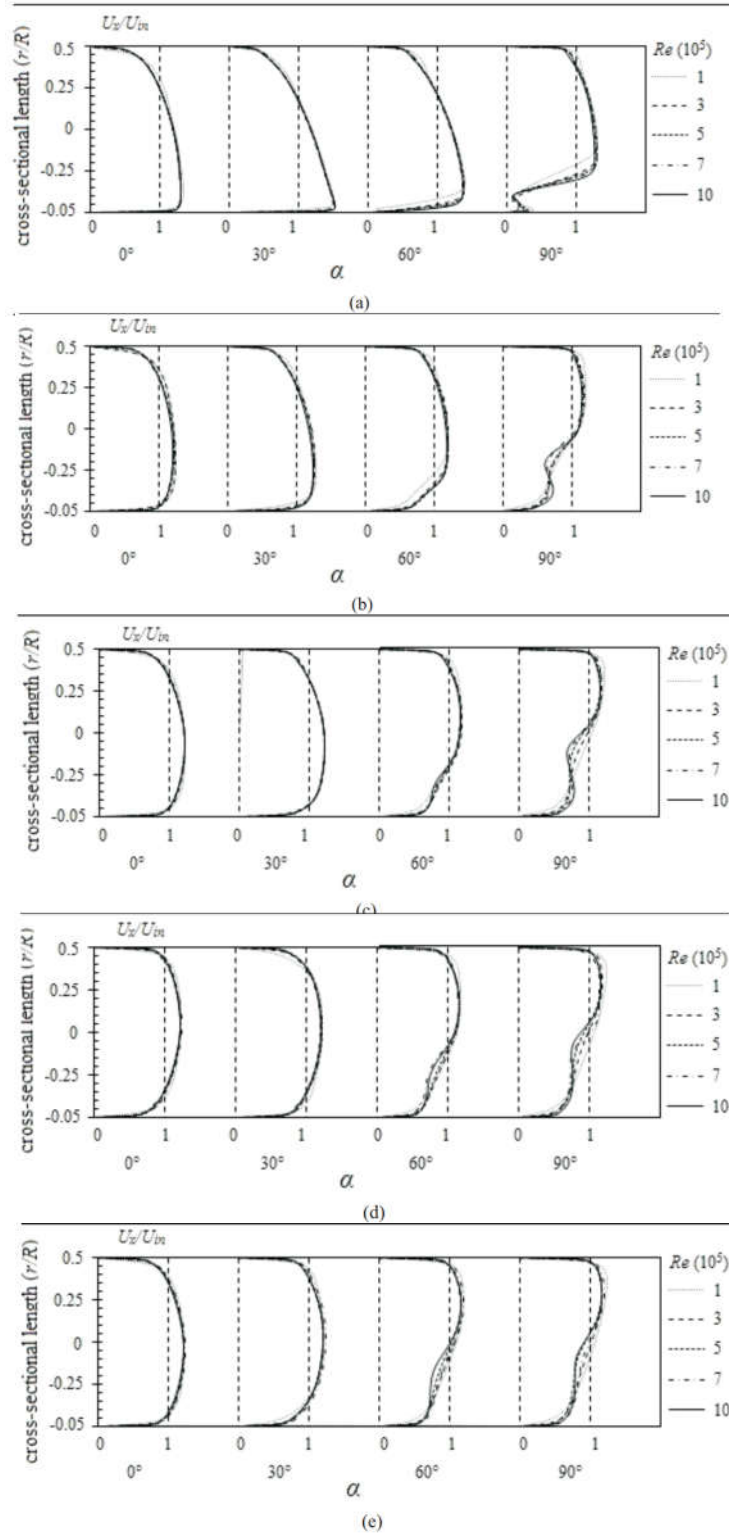
Profil kecepatan aliran melewati *valve* ditampilkan dalam Gambar 2.16, pada sudut bukaan 10° belum ada separasi yang terlihat, pada sudut 20° mulai terbentuk separasi aliran, namun terlihat melekat kembali. Perpanjangan separasi ini meningkat seiring dengan bukaan *valve* dan mencapai puncaknya pada sudut 45° seperti dalam Gambar 2.16.



Gambar 2.16 Profil Kecepatan aliran setelah melewati *valve*

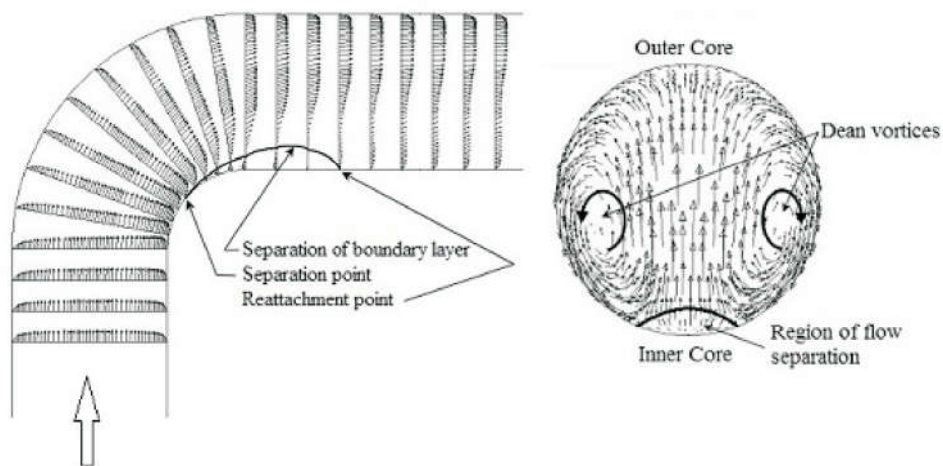
Dutta, P. dan **Nandi, N** (2015) melakukan penelitian secara CFD terhadap pengaruh dari bilangan Reynolds dan besaran radius *elbow* terhadap karakteristik aliran pada *downstream elbow*. Aliran yang digunakan merupakan aliran turbulen dengan fasa tunggal yang melewati pipa dan *elbow* 90° dengan variasi radius terhadap diameter pipa (R_c/D) 1 sampai 5 pada bilangan Reynolds 1×10^5 hingga 10×10^5 . Penelitian dilakukan secara CFD dengan model turbulen k- ϵ standar dengan mesh berjenis *hexahedral map*.

Pada Gambar 2.17 menunjukkan profil kecepatan pada beberapa variasi bilangan Reynolds dan radius *elbow*, dari beberapa variasi bilangan Reynolds pada setiap variasi radius menunjukkan hampir tidak ada pengaruh dari bilangan Reynolds terhadap profil kecepatan, hal ini terlihat dari setiap grafik yang mewakili masing-masing bilangan Reynolds saling berhimpit dengan grafik lainnya terutama pada inlet *elbow* dan posisi 30° setelah aliran memasuki *elbow*. Untuk profil kecepatan pada posisi 60° dan outlet memiliki perbedaan yang tidak signifikan hanya pada daerah sedikit dibawah *centerline* namun masih memiliki tendensi yang sama untuk masing-masing profil kecepatan.



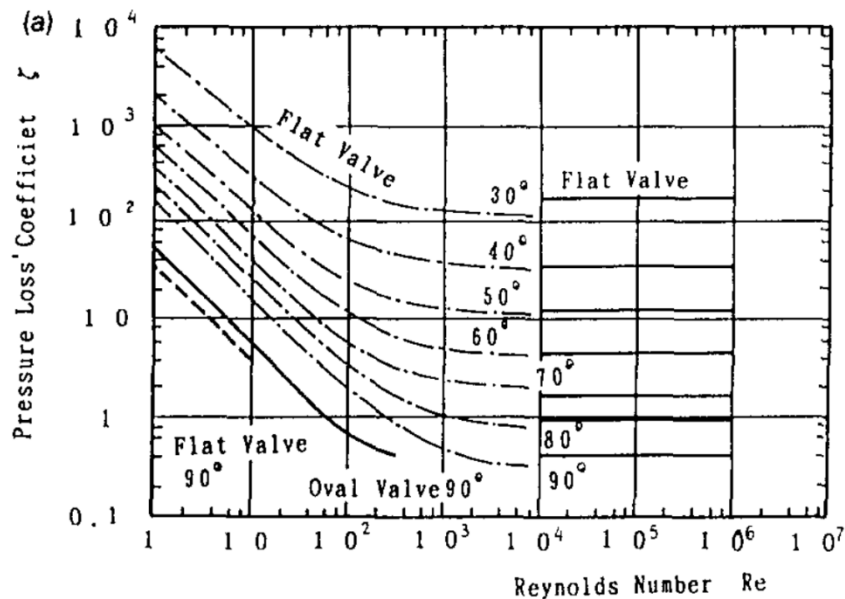
Gambar 2.17 Profil Kecepatan Pada *Elbow* dengan Beberapa Variasi Re dan Radius *Elbow* a) $R_c/D = 1$, b) $R_c/D = 2$, c) $R_c/D = 3$, d) $R_c/D = 4$, e) $R_c/D = 5$ (Dutta dan Nandi, 1995)

Vektor kecepatan pada *downstream* ditampilkan dalam Gambar 2.18 yang diambil pada outlet *elbow* dengan variasi radius 1D dan bilangan Reynolds 1×10^5 dimana terlihat perpindahan kecepatan rata-rata dari sisi *inner* radius *elbow* menuju sisi *outer* radius *elbow* yang dimulai dari $\alpha=60^\circ$ hingga $\alpha=90^\circ$ sehingga menimbulkan pola aliran yang tidak stabil dan kompleks. Daerah ini dibagi disebut zona separasi yang luas daerahnya tergantung dari radius *elbow*, semakin kecil radius *elbow* maka semakin luas pula zona separasi ini. Kecenderungan daerah ini berada pada sisi *inner* radius *elbow*, hal ini berkaitan dengan gaya sentrifugal pada aliran dengan kecepatan tinggi dan gradien tekanan pada aliran.



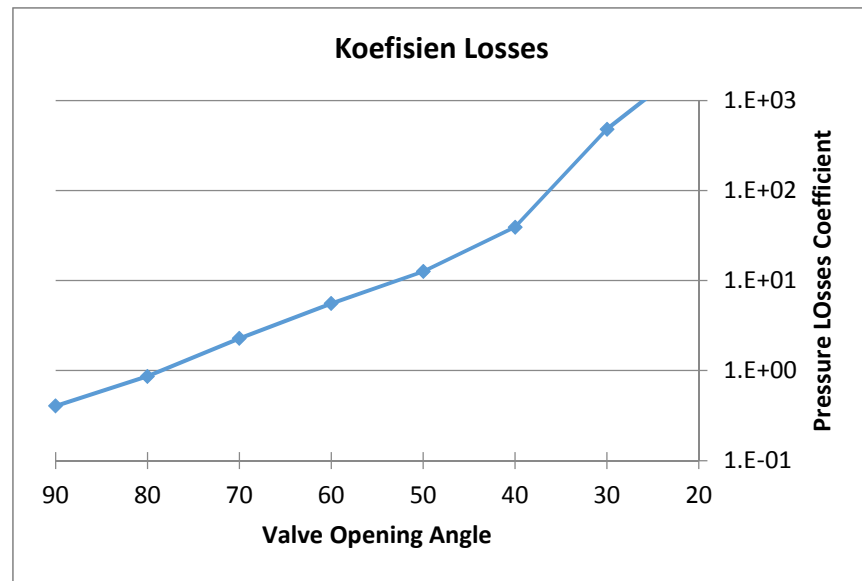
Gambar 2.18 Profil dan vektor kecepatan pada $Re\ 1 \times 10^5$ dengan radius 1D (Dutta dan Nandi, 1995)

Kimura, dkk (1995) melakukan penelitian secara eksperimen untuk mengetahui pengaruh dari bentuk geometri *butterfly valve*, besar bukaan *butterfly valve* dan bilangan Reynolds terhadap koefisien *pressure losses* pada daerah *downstream*. Penelitian dilakukan menggunakan fluida air yang mengalir didalam pipa pada bilangan Reynolds 7×10^3 hingga 5×10^5 . Pada Gambar 2.19 memperlihatkan grafik pengaruh bilangan Reynolds terhadap koefisien *pressure losses* pada sebuah *butterfly valve* tipe flat, koefisien *pressure losses* terpengaruh oleh bilangan Reynolds secara signifikan pada nilai dibawah 10^4 , sedangkan untuk nilai diatas angka tersebut bilangan Reynolds tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap koefisien *pressure losses*.



Gambar 2.19 Perbandingan Bilangan Reynolds Terhadap Koefisien *Pressure Losses* (Kimura, dkk, 1995)

Pengaruh dari bentuk dari geometri *valve* dan sudut bukaan *valve* terhadap koefisien *pressure losses* ditampilkan dalam Gambar 2.20, dari beberapa bentuk *butterfly valve* yang digunakan dalam penelitian menunjukkan pengaruh yang tidak signifikan dan hanya terjadi pada sudut bukaan 70° hingga 90° (terbuka penuh). Pada saat *valve* dibuka pada sudut 60° atau kurang bentuk geometri dari *valve* sudah tidak memberikan pengaruh terhadap koefisien *pressure losses*, hal ini terlihat dari grafik yang sudah berhimpit dari keempat jenis *butterfly valve*. Dari grafik pada Gambar 2.20 terlihat peningkatan koefisien *pressure losses* tidak linier terhadap peningkatan sudut bukaan *valve*. hal ini tidak hanya dikarenakan oleh pengurangan luas permukaan yang dialiri oleh fluida, namun juga disebabkan adanya efek *nozzle* dan *diffuser*.



Gambar 2.20 Pengaruh sudut bukaan *Valve* terhadap Koefisien *Pressure Losses*
(Kimura, dkk, 1995)

Berdasarkan teori-teori dan penelitian sebelumnya yang telah dibahas dalam bab 2 ini, selanjutnya diaplikasikan dalam penelitian ini untuk mencapai tujuan yang diharapkan. Dalam pencapaian tersebut diperlukan tahapan-tahapan yang sistematis berupa metode-metode untuk persiapan penelitian hingga mengolah data hasil penelitian yang akan dibahas lebih lanjut dalam bab selanjutnya, yaitu bab 3.

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

BAB 3

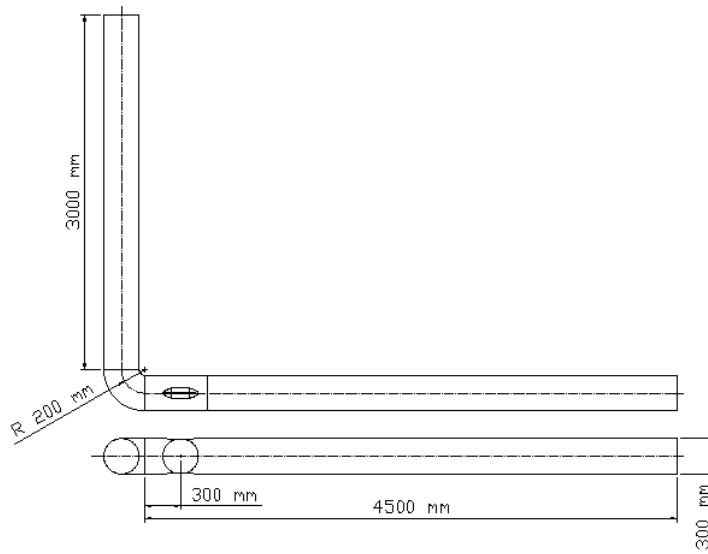
METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dilakukan studi secara numerik sesuai dengan permasalahan dalam bab sebelumnya. Hal-hal yang akan dibahas dalam bab ini diantaranya domain simulasi, *mesh*, kondisi batas, dan parameter-parameter yang digunakan dalam simulasi. Dalam penentuan parameter-parameter tersebut didasarkan pada studi yang telah dilakukan pada bab 2 sebelumnya.

3.1. Geometri Pipa

Geometri pada penelitian ini berupa pipa berbahan galvanis, pada *upstream* terhubung dengan *elbow* 90°, dan terdapat bodi pengganggu berupa *butterfly valve* yang terletak pada $x/D=1$ setelah *elbow* seperti dalam Gambar 3.1. *Butterfly valve* nantinya akan divariasikan dengan sudut bukaan 0° vertikal, 0° horizontal, 30° CW horizontal, dan 30° CCW horizontal. Spesifikasi dari domain geometri sebagai berikut :

- | | |
|---|----------------------------------|
| • Bentuk penampang | = lingkaran |
| • Diameter internal pipa dan <i>elbow</i> (D) | = 300 mm |
| • Panjang <i>upstream</i> (L_0) | = 3000 mm |
| • Panjang <i>downstream</i> (L_1) | = 4500 mm |
| • Radius <i>elbow</i> (R) | = 200 mm ($R = \frac{2}{3} D$) |
| • Kekasaran dinding pipa | = 0.15 mm |



Gambar 3.1 Geometri pipa dengan bukaan *valve* 0° horizontal

3.2. Parameter Uji

Parameter yang dijaga konstan dalam penelitian ini adalah :

- Jenis fluida kerja (udara) pada kondisi STP, $\rho=1,225 \text{ kg/m}^3$, $\mu=1.79 \text{ e-05 kg/ms}$
- Bentuk dan ukuran geometri pipa dan *valve*

Parameter yang divariasikan dalam penelitian ini adalah :

- Model turbulen (k- ϵ (standard, RNG, Realizable), k- ω (standard, SST)), untuk model tanpa *valve*
- Sudut bukaan *valve* :
 - $\alpha=0^\circ$ (terbuka penuh) yang dipasang pada sumbu vertikal (sumbu *valve* tegak lurus terhadap sumbu elbow)
 - $\alpha=0^\circ$ (terbuka penuh) yang dipasang pada sumbu horizontal (sumbu *valve* sejajar dengan sumbu *elbow*)
 - $\alpha=30^\circ$ CW pada sumbu valve horizontal dan
 - $\alpha=30^\circ$ CCW pada sumbu valve horizontal.
- Bilangan Reynolds (2×10^5 (10 m/s) dan 8×10^5 (40 m/s))

3.3. Metode Numerik

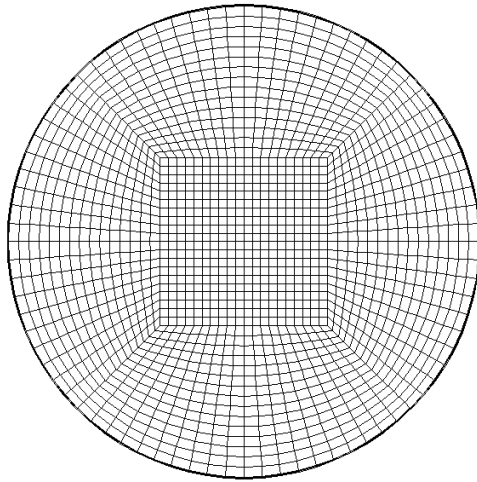
Penelitian ini dilakukan secara numerik dengan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* yang dimulai dengan membuat geometri dan melakukan diskritisasi pada model pada tahap *pre processing* untuk nantinya akan dilakukan perhitungan pada tahap *processing*, dan dilanjutkan dengan pengambilan data pada tahap *post processing*.

3.4.1. Tahap Pre Processing

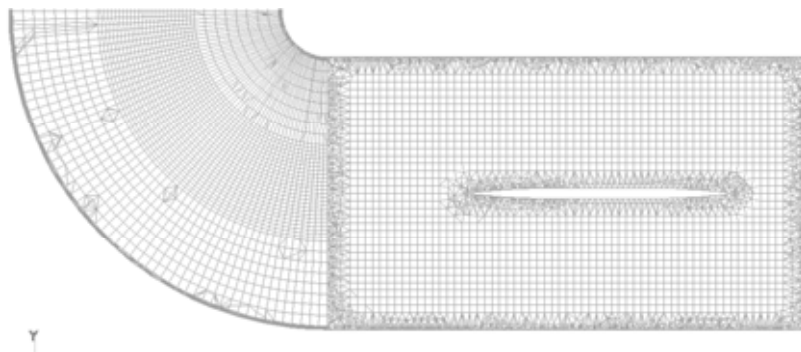
Langkah- langkah yang dilakukan pada tahapan ini antara lain :

- a. Membuat geometri/model pertama yang dibuat adalah pipa tanpa *valve*, dengan dimensi mengacu pada Gambar 3.1. Pada penampang pipa di bagi hingga menjadi lima bagian untuk membantu proses pembuatan *mesh* seperti dalam Gambar 3.2 dan 3.3. Geometri ini digunakan dalam proses *grid independensi* dan validasi terhadap eksperimen yang dilakukan oleh **Danbon** dan **Sollicc** (2000)
- b. Membuat geometri pipa yang telah dilengkapi dengan *butterfly valve*, dengan sudut bukaan $\alpha=0^\circ$ vertikal, 0° horizontal, 30° CW horizontal, dan 30° CCW horizontal dengan basis dari geometri pipa yang telah dibuat sebelumnya. Pembuatan *valve* dilakukan dengan melakukan *subtract* pada pipa oleh *valve*
- c. Membuat *mesh* pada tiap geometri yang telah dibuat sebelumnya dengan membagi model yang solid menjadi bagian-bagian kecil. Pada daerah dekat dinding digunakan *boundary mesh*, sedangkan untuk *mesh* pada zona lain digunakan jenis Hex (*hexahedral*) yang ditampilkan dalam Gambar 3.2. *Mesh* jenis ini tidak dapat diaplikasikan pada zona yang disekitar *valve*, sehingga pada zona ini digunakan *mesh* gabungan antara hexahedral dengan *tetrahedral* seperti ditampilkan dalam Gambar 3.3
- d. Untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat dan konvergen, maka diperlukan *mesh* dengan kualitas yang baik pula. Beberapa hal yang harus diperhatikan dalam pembuatan *mesh* antara lain :
 1. *Equisize skew* maupun *equiangle skew* tidak melebihi 0,9
 2. Meminimalkan perubahan ukuran *mesh* yang ekstrim

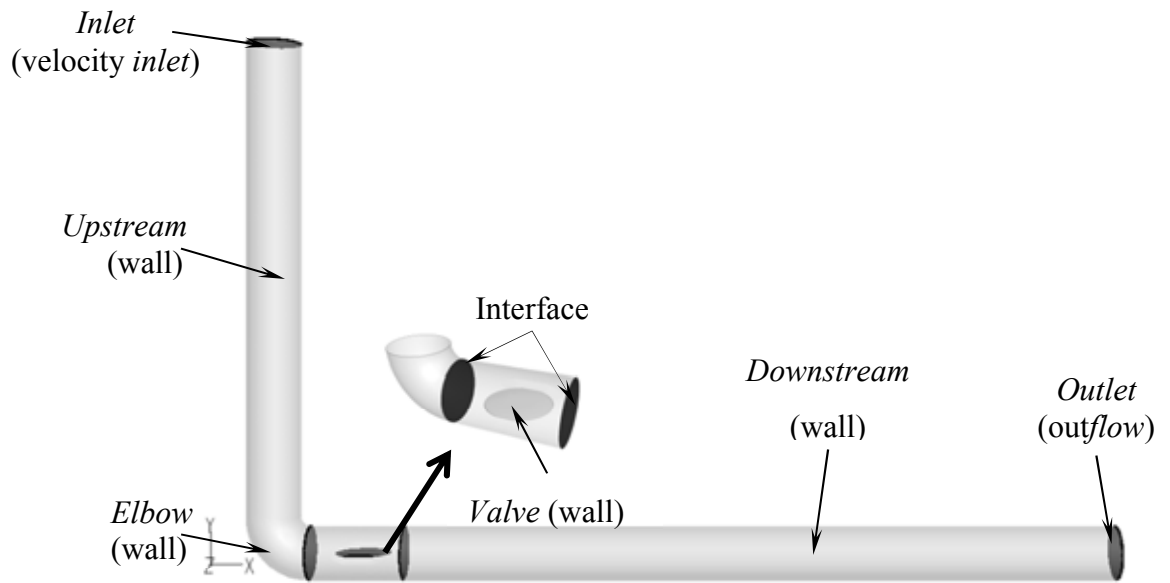
Langkah selanjutnya adalah mendefinisikan kondisi batas pada geometri, yaitu memberikan properti pada *inlet*, dinding pipa, *outlet*, dan *interface* yang menghubungkan antara zona *elbow* dengan zona *valve*, dan zona *valve* dengan zona *downstream* seperti dalam Gambar 3.4.



Gambar 3.2 Mesh pada penampang melingkar pipa dan elbow



Gambar 3.3 Penampang mesh pada elbow dan valve 0° horizontal



Gambar 3.4 Domain simulasi dan kondisi batas pada model pipa

3.4.2. Tahap Processing

Pada tahap ini dilakukan proses perhitungan dengan bantuan perangkat lunak CFD komersial untuk setiap variasi, dimana pada tahap *grid* independensi digunakan parameter seperti yang ditampilkan dalam Tabel 3.1.

Untuk tahap pengujian model turbulen yang sesuai dalam penelitian ini parameter yang digunakan masih sesuai dengan Tabel 3.1, namun untuk setting model turbulen disesuaikan dengan variasi model turbulen yang sedang diuji.

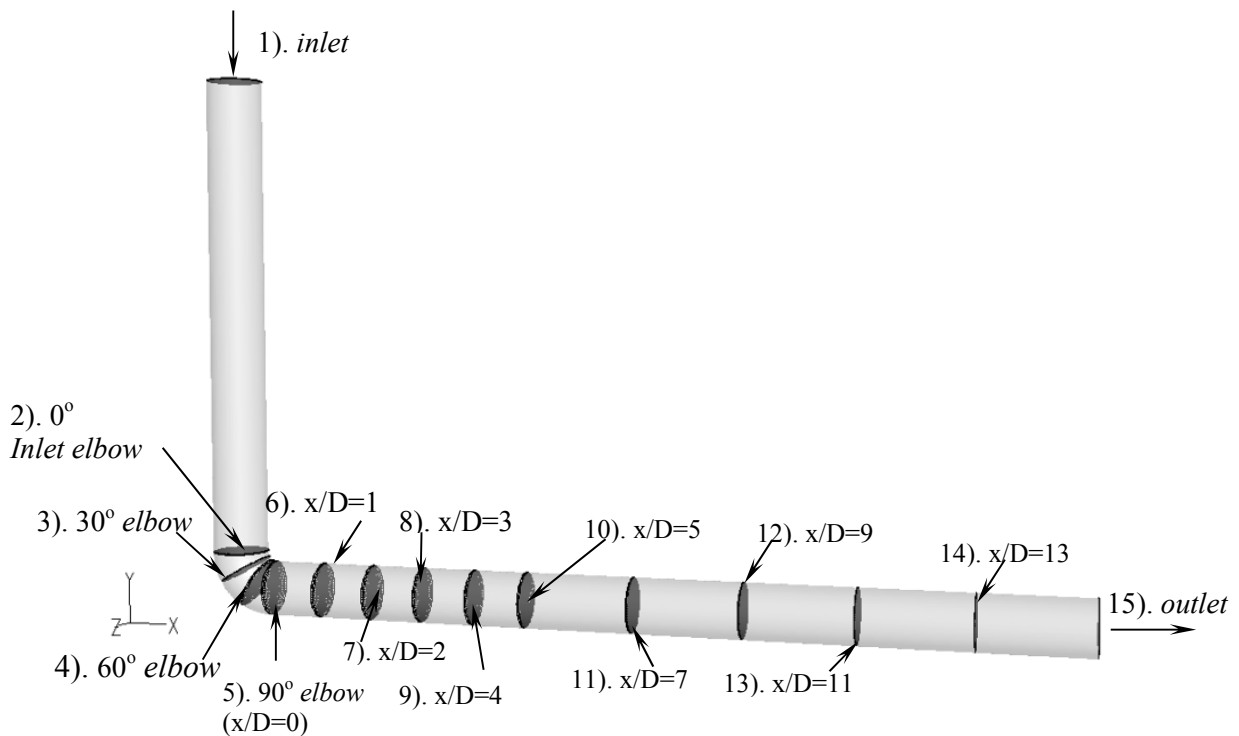
Tabel 3.1 Pengaturan parameter processing

| Jenis Parameter | Nilai |
|----------------------|------------------------|
| Solver | <i>Pressure Based</i> |
| Time | Steady |
| Formulation | Implicit |
| Space | 3D |
| Velocity Formulation | Absolute |
| Gradient Option | Green-Gauss Cell Based |
| Porous Formulation | Super Ficial Velocity |
| Material | Air |

| Jenis Parameter | Nilai |
|-----------------------------------|---------------------|
| Solution <i>Pressure</i> | Second Order |
| Solution Momentum | Second Order Upwind |
| Solution Turbulent Kinetic Energy | Second Order Upwind |
| Solution Dissipation Rate | Second Order Upwind |
| <i>Pressure-Velocity Coupling</i> | SIMPLE |
| Initialize | <i>Inlet</i> |
| Residual | 1e-6 |

3.4.3. Tahap Post Processing

Tahap ini diperlukan untuk memperoleh data dari perhitungan yang telah dilakukan, baik kualitatif maupun kuantitatif. Data kualitatif yang akan diambil berupa vektor kecepatan, kontur kecepatan, dan kontur tekanan, sedangkan data kuantitatif yang akan diambil berupa profil kecepatan dan tekanan pada *inlet* dan *outlet* domain. Lokasi pengambilan ditampilkan pada Gambar 3.5.



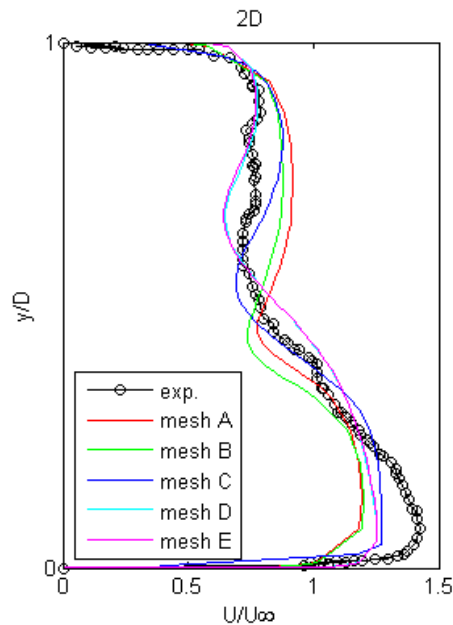
Gambar 3.5 Lokasi pengambilan data

3.4. *Grid* Independensi dan Validasi

Tahapan *grid* independensi dilakukan untuk meminimalisir waktu perhitungan dan memperoleh hasil perhitungan yang akurat pada proses *pre-processing*, *processing*, dan *post processing* dengan cara membandingkan tingkat kesalahan pada beberapa perhitungan dengan parameter yang sama kecuali pada kerapatan dan struktur *grid*. *Grid* yang optimal diperoleh pada jumlah *grid* dimana penurunan tingkat *error* terhadap jumlah *grid* yang lebih rapat tidak signifikan. Analisa tersebut dilakukan pada model pipa seperti dalam Gambar 3.2 dengan variasi kerapatan dan jumlah *mesh* pada 5 model. Parameter yang dibandingkan pada proses ini adalah kecepatan rata-rata pada *downstream* $x/D=5$, kemudian dibandingkan dengan data eksperimen yang dilakukan oleh **Danbon** dan **Sollic** (2000) dan ditampilkan dalam Tabel 3.2

Tabel 3.2 Hasil *grid* independensi dan validasi pada model tanpa *valve*

| Jenis Mesh | Jumlah Node | y^+ | \bar{U}_{CFD} | $\bar{U}_{exp} (2D)$ | % Error |
|------------|-------------|-------|-----------------|----------------------|---------|
| A | 234.311 | 50.07 | 0.949 | 0.941 | 0.85 |
| B | 437.206 | 23.47 | 0.922 | | 2.01 |
| C | 620.000 | 29.33 | 0.938 | | 0.32 |
| D | 1.068.480 | 25.19 | 0.931 | | 1.00 |
| E | 1.350.440 | 25.26 | 0.929 | | 1.21 |

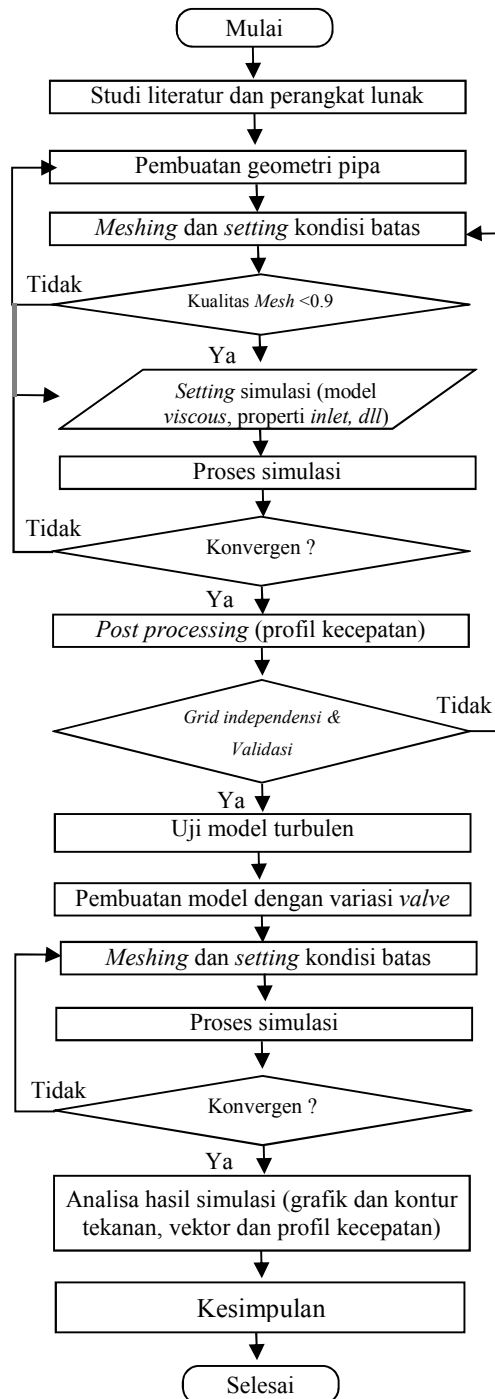


Gambar 3.6 Profil kecepatan pada $x/D=2$

Tabel 3.2 menunjukkan kecepatan rata-rata pada posisi $x/D=2$ *downstream* dari pipa dengan *elbow* tanpa *valve*, dimana \bar{U} dinyatakan dalam bilangan tak berdimensi hasil pembagian dari kecepatan lokal dengan kecepatan maksimal pada *inlet*, kemudian dibandingkan dengan data eksperimen untuk memperoleh tingkat kesalahan. Dari kelima jenis variasi jumlah *mesh*, dimulai dari jumlah *mesh* paling kasar yaitu *mesh A* dengan 234.311 *node* hingga yang paling halus yaitu *mesh E* yaitu dengan 1.350.440 *node* dilakukan simulasi dengan fluida udara pada bilangan Reynolds 8×10^5 dan model turbulen k-epsilon standar dengan *standard wall function*. Dari simulasi kelima jenis *mesh*, semua mencapai tingkat konvergen pada residual 10^{-6} dan memperoleh Y^+ seperti dalam Tabel 3.2. Dari data kecepatan rata-rata yang diambil pada $x/D=2$, pada Tabel 3.2 terlihat *mesh C* memiliki tingkat kesalahan terkecil dibandingkan *mesh* yang lain yang memiliki jumlah *node* lebih kecil maupun lebih besar, yaitu sebesar 0,32 %. Pada Gambar 3.6 menunjukkan profil kecepatan aliran dimana *mesh C* memiliki profil yang mendekati eksperimen. Dengan demikian *mesh C* merupakan *mesh* yang paling optimum untuk dilakukan simulasi selanjutnya, yaitu pengujian model turbulen dan simulasi dengan variasi sudut dan arah bukaan *valve*.

3.5. Diagram Alir Penelitian

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang baik dan sistematis, maka dilakukan langkah-langkah sebagai berikut :



Gambar 3.7 Diagram alir penelitian

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan ditampilkan hasil dari simulasi numerik yang telah dilakukan melalui data yang diperoleh pada tahapan *post processing* berupa kontur kecepatan, profil kecepatan, dan penurunan tekanan untuk setiap variasi sudut bukaan *valve* pada bilangan Reynolds 2×10^5 dan 8×10^5 . Data diambil pada posisi tertentu seperti yang ditampilkan bab sebelumnya.

Pada tahap awal penelitian ini dilakukan pengujian model turbulen yang sesuai untuk memperoleh hasil yang mendekati dengan eksperimen yang dilakukan oleh **Danbon** dan **Sollicc** (2000). Model turbulen yang sesuai nantinya akan digunakan untuk menganalisa profil aliran yang melewati *elbow* dan *butterfly valve* pada kecepatan aliran 10 m/s dan 40 m/s. Pada proses simulasi dilakukan variasi terhadap pemasangan *valve*, yaitu *valve* dipasang pada sumbu vertikal dan horizontal, masing-masing dipasang pada $\alpha=0^\circ$ (terbuka penuh). Selain variasi arah sumbu pemasangan *valve*, pada posisi sumbu horizontal juga dilakukan variasi arah bukaan, dimana *valve* dibuka pada $\alpha=30^\circ$ CW dan $\alpha=30^\circ$ CCW.

4.1. Uji Model Turbulen

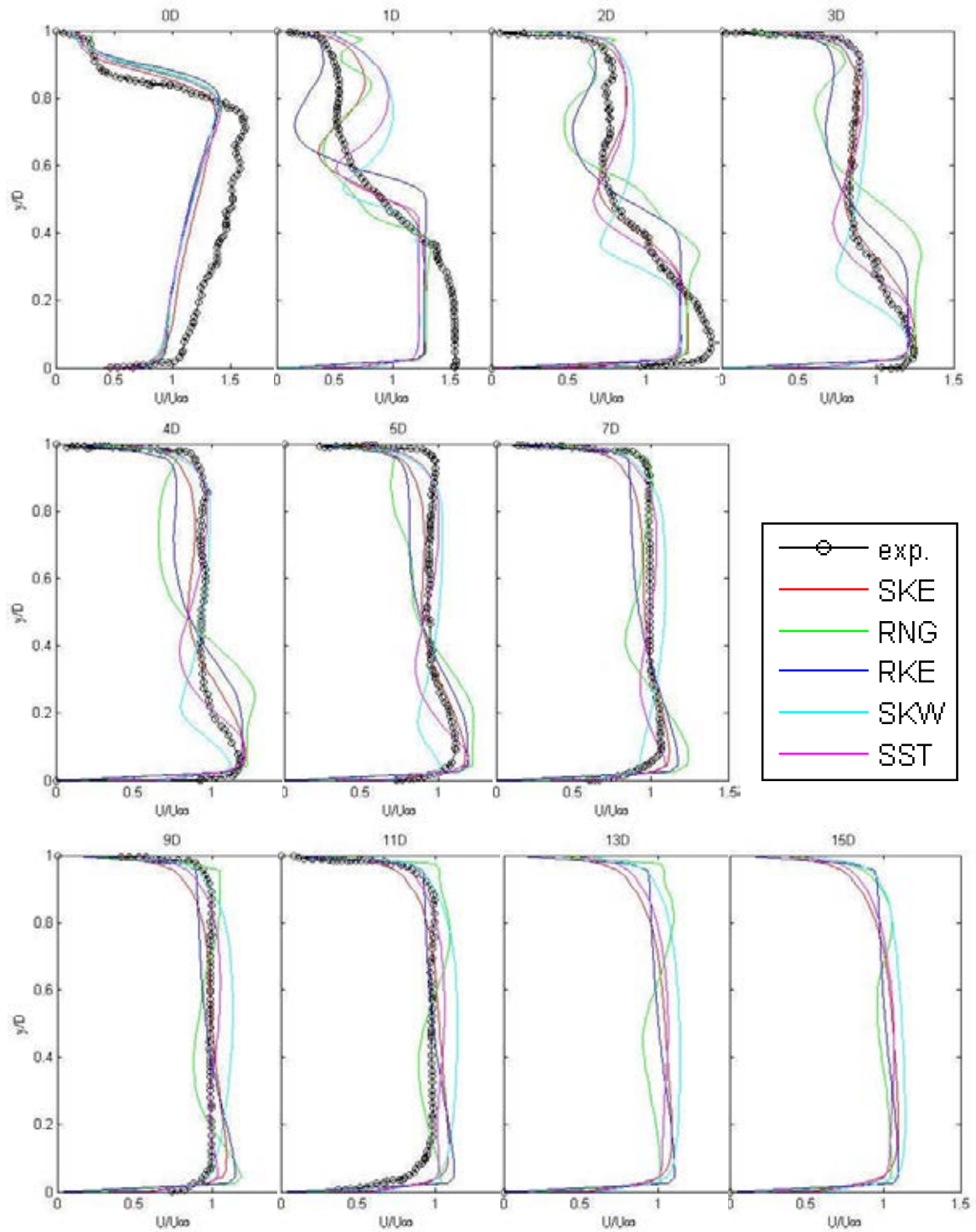
Pengujian model turbulen dilakukan untuk memperoleh gambaran model turbulen yang sesuai dalam penelitian ini, yaitu dengan membandingkan profil kecepatan pada daerah *downstream* dari hasil simulasi dengan data penelitian yang dilakukan oleh **Dandon** dan **Sollicc** (2000). Kriteria yang digunakan adalah persamaan tendensi pada profil kecepatan, profil kecepatan dari berbagai model turbulen yang diuji akan dibandingkan dan akan dipilih yang paling mendekati dengan data eksperimen. Perbandingan profil kecepatan dilakukan pada beberapa posisi seperti ditampilkan dalam Gambar 4.1. Beberapa model turbulen yang dipilih antara lain k- ϵ standar, k- ϵ RNG, k- ϵ realizable, k- ω standar, dan k- ω SST.

Pengujian dilakukan berdasarkan hasil *grid independency* yang telah dilakukan pada bab sebelumnya untuk menentukan jumlah node yang digunakan, pengujian dilakukan pada geometri pipa dan *elbow* tanpa *valve*. Profil kecepatan pada *downstream* ditampilkan pada sumbu X dalam bilangan tak berdimensi dimana kecepatan pada suatu titik dibagi dengan kecepatan pada *inlet* (U/U_∞), sedangkan pada sumbu Y juga ditampilkan dalam bentuk bilangan tak berdimensi dimana besaran Y dibagi dengan diameter pipa (y/D) dimana untuk $y/D=0$ adalah sisi sejajar dengan *outer outlet elbow* dan $y/D=1$ adalah sisi sejajar dengan *inner outlet elbow*.

Pada $x/D=0$ semua model turbulen yang diuji memiliki tendensi yang sama terhadap profil kecepatan hasil eksperimen, profil kecepatan pada $x/D=1$ mulai terlihat adanya perbedaan pada masing-masing model turbulen dimana kesemuanya *under-predict* pada sisi *outer elbow* dan *over-predict* pada sisi *inner elbow* kecuali model turbulen $k-\epsilon$ Realizable yang tetap *under-predict*. Pada $x/D=2$ hingga $x/D=5$ profil kecepatan dari masing-masing model turbulen mulai berkembang mendekati profil kecepatan pada eksperimen, hingga pada $x/D=9$ profil kecepatan pada eksperimen mulai *recovery* dengan membentuk aliran yang seragam yang ditandai dengan profil yang sama antara sisi sejajar *inner* dan *outer outlet elbow* dan tidak terjadi perubahan profil kecepatan hingga akhir *downstream*. Pada kondisi ini, model turbulen yang memiliki profil kecepatan paling mendekati dengan hasil eksperimen adalah $k-\omega$ SST, hanya terdapat sedikit perbedaan pada sisi sejajar *inner elbow*. Hal ini berbeda dengan model turbulen lainnya yang masih *over-predict* pada sisi sejajar *outer elbow*, sehingga profil aliran belum *fully recovery* dan profil aliran tidak simetris antara sisi sejajar *inner* dan *outer outlet elbow*.

Berdasarkan hasil yang diperoleh pada pengujian diatas maka untuk analisa pada posisi *valve* lainnya akan digunakan model turbulen $k-\omega$ SST karena profil kecepatan yang dihasilkan paling mendekati dengan profil kecepatan hasil eksperimen dibandingkan dengan model turbulen lainnya dan menjadi satu-satunya model turbulen yang mencapai *fully recovery*. Hasil yang ditampilkan dalam uji model turbulen ini sesuai dengan karakteristik dari model turbulen $k-\omega$ SST, yaitu memberikan prediksi yang lebih baik pada aliran turbulen yang

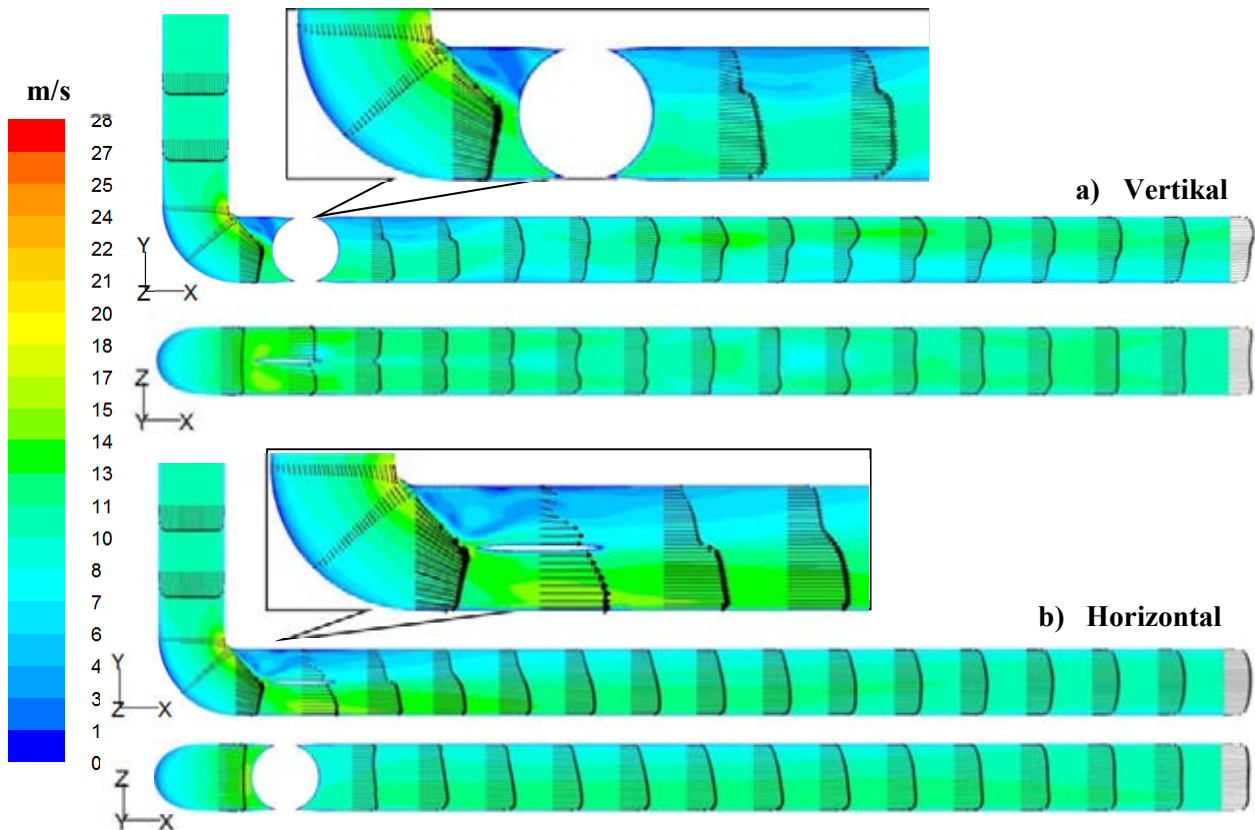
mengalami *adverse pressure gradient* dan *separasi*. Model turbulen ini juga sesuai untuk aliran *incompressible*.



Gambar 4.1 Perbandingan profil kecepatan pada uji model turbulen pada posisi $x/D=0;1;2;3;4;5;7;9;11;13;15$

4.2. Karakteristik aliran pada pada $Re\ 2 \times 10^5$

Pada subbab ini akan dilakukan analisa terhadap profil dan vektor kecepatan dengan dua perbandingan, yaitu pada saat *valve* terbuka penuh ($\alpha=0^\circ$) dengan pemasangan pada sumbu vertikal maupun horizontal dan kondisi *valve* dibuka dengan sudut $\alpha=30^\circ$ CW dan $\alpha=30^\circ$ CCW pada sumbu horizontal.



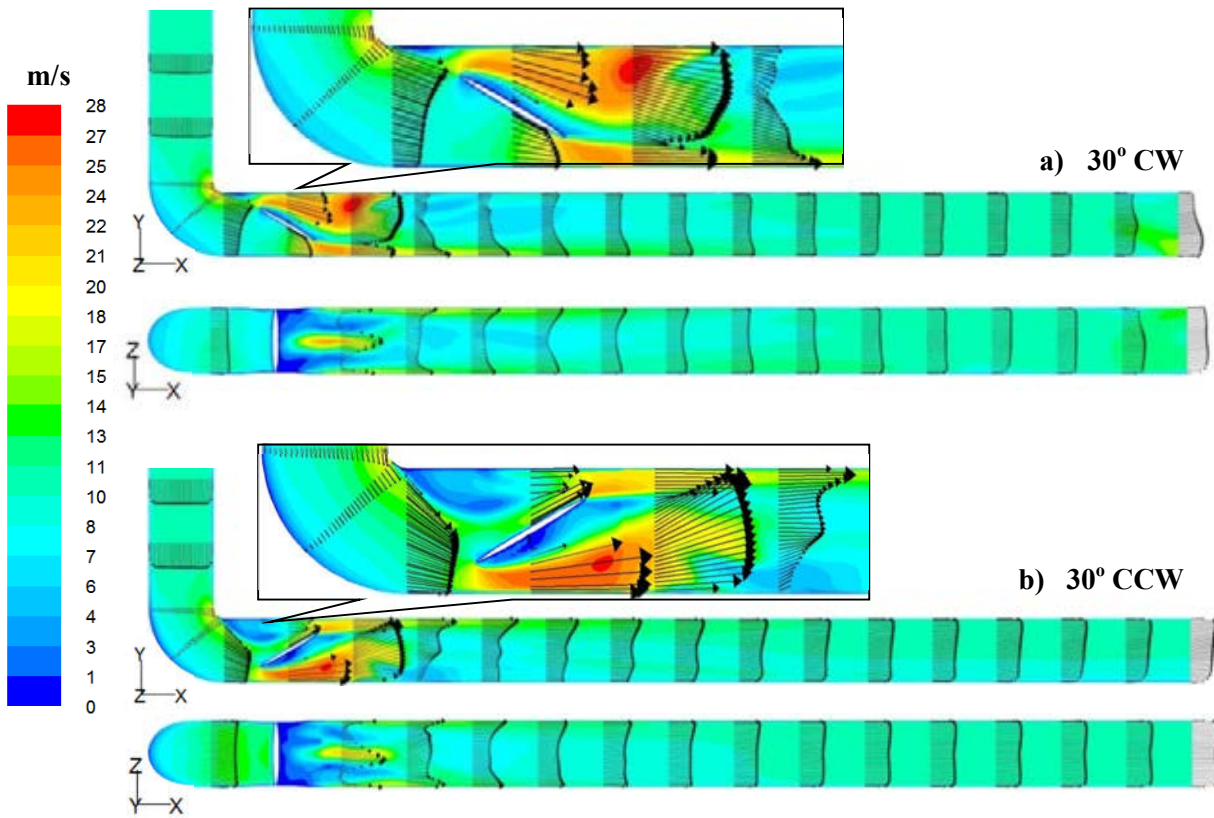
Gambar 4.2 Kontur dan vektor kecepatan untuk *valve* terbuka penuh pada sumbu vertikal dan horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$

Pada Gambar 4.2 ditampilkan kontur dan vektor kecepatan pada potongan memanjang dari *valve* yang terbuka penuh baik yang dipasang pada sumbu vertikal maupun horizontal pada bilangan Reynolds 2×10^5 , *inlet* pada masing-masing pipa memiliki kecepatan yang sama yaitu 10 m/s. Kontur kecepatan pada *inner* radius *elbow* menunjukkan nilai yang sama untuk *valve* dengan posisi $\alpha=0^\circ$ (terbuka penuh) pada sumbu vertikal, dan horizontal. Perbedaan kecepatan pada sisi *inner* dan *outer elbow* dipengaruhi oleh perbedaan tekanan diantara kedua sisi tersebut, perbedaan tekanan ini akan berpengaruh

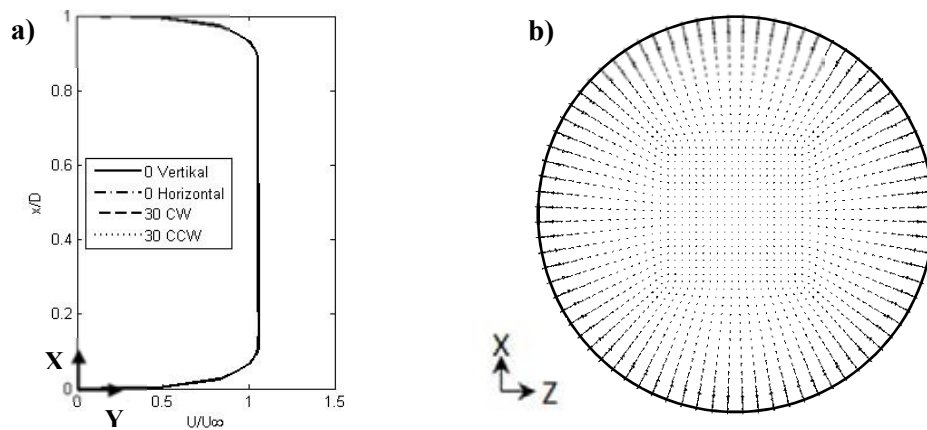
hingga *outlet elbow*. Aliran yang melewati *elbow* mengalami kerugian energi kinetik yang disebabkan oleh terbentuknya aliran sekunder pada sisi *inner elbow*, sehingga sebagian aliran akan mengalir pada sisi sejajar *outer elbow* dengan kecepatan yang lebih tinggi (ditandai dengan warna hijau tua pada *outlet elbow*), pada posisi *valve* terbuka penuh dengan $\alpha=0^\circ$ yang dipasang secara vertikal daerah ini tersebar secara tidak beraturan setelah aliran melewati *valve*, hal yang berbeda terlihat pada *valve* yang dipasang secara horizontal pada $\alpha=0^\circ$ dimana kecepatan aliran yang lebih tinggi melewati *valve* pada sisi sejajar *outer elbow* dan aliran dengan kecepatan lebih rendah melewati *valve* pada sisi sejajar *inner elbow* sehingga kecepatan aliran pada *downstream* lebih teratur. Perbedaan kecepatan pada kedua sisi ini terlihat lebih jelas pada profil kecepatan yang ditampilkan dimana sebelum melewati *elbow* aliran memiliki profil kecepatan yang sama hingga melewati *elbow*. Perbedaan profil kecepatan terjadi setelah melewati *valve* yang dipasang pada dua sumbu berbeda akan dibahas pada subbab selanjutnya.

Pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=30^\circ$ baik CW maupun CCW terjadi dua fenomena, yaitu efek *nozzle* dan *diffuser*. Efek *nozzle* terjadi apabila pada *upstream valve* memiliki luas penampang yang lebih kecil dibandingkan sisi *downstreamnya*, sebaliknya untuk efek *diffuser* yaitu pada sisi *upstream* memiliki luas penampang yang lebih luas dari pada sisi *downstreamnya*. Gambar 4.3a menunjukkan kontur dan profil kecepatan pada *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW dimana efek *nozzle* terjadi pada sisi sejajar dengan *inner outlet elbow* yang memiliki kecepatan lebih rendah bila dibandingkan dengan sisi sejajar *outlet elbow*, sehingga peningkatan kecepatan aliran pada *downstream valve* lebih besar pada sisi sejajar *inner elbow* dimana hal ini memiliki kecenderungan yang sama dengan penelitian yang dilakukan oleh **Dawy, et.al** (2013), sehingga perbedaan kecepatan pada *downstream valve* sejajar *inner* dan *outer elbow* tidak terlalu besar dikarenakan pada *upstream valve* sejajar *outer elbow* sudah memiliki kecepatan yang lebih tinggi. Perbedaan kecepatan ini berangsur-angsur berkurang hingga aliran mendekati *fully recovery* pada $x/D=13$. Kontur dan vektor kecepatan pada Gambar 4.3b menunjukkan efek *diffuser* terjadi pada sisi sejajar *inner outlet elbow* dan efek *nozzle* pada sisi sejajar *outer outlet elbow*, sehingga kecepatan pada *downstream valve* sejajar *outlet elbow* lebih besar dibandingkan sisi sejajar

inner outlet elbow, perbedaan kecepatan pada kedua sisi ini bertahan hingga akhir *downstream* pipa, sehingga aliran belum mendekati *fully recovery*.



Gambar 4.3 Kontur dan vektor kecepatan untuk *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW dan CCW pada sumbu horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$



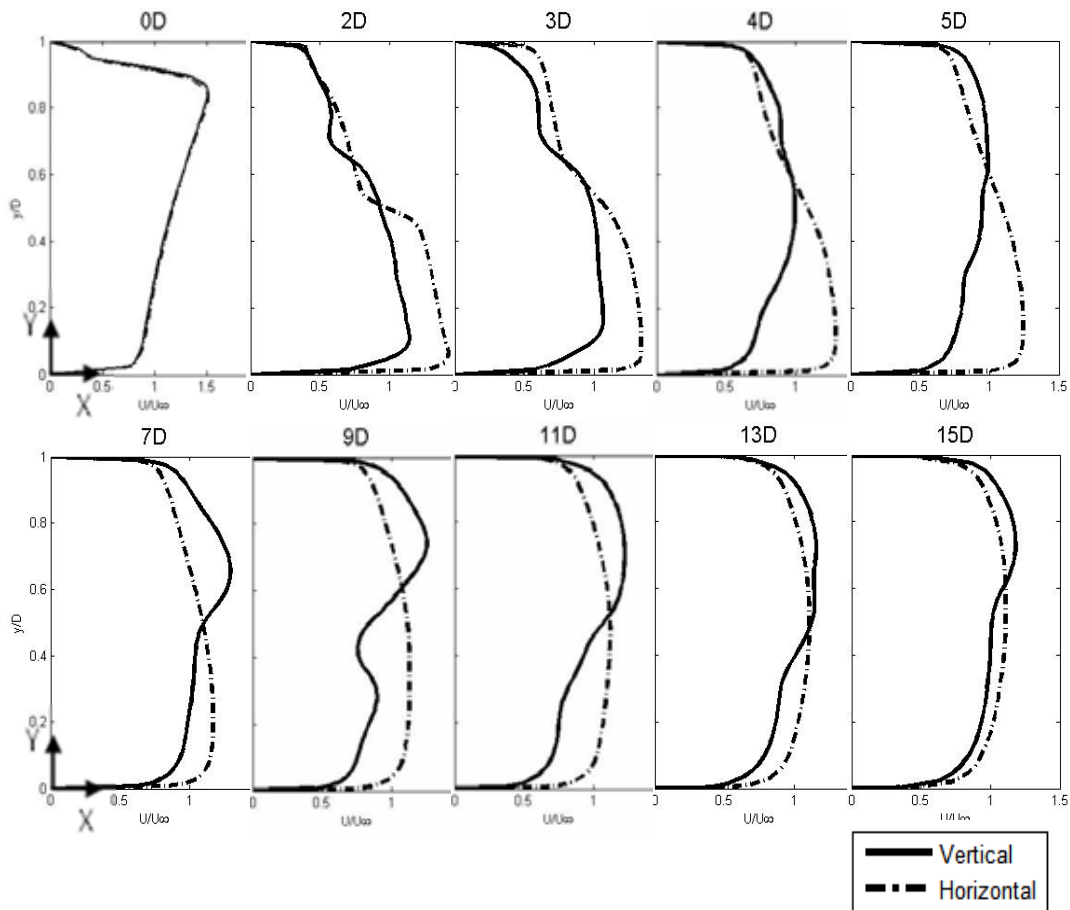
Gambar 4.4 Kondisi aliran dengan $Re\ 2 \times 10^5$ pada jarak $2D$ sebelum melewati *elbow*
a) profil kecepatan, b) vektor kecepatan

Gambar 4.4 merupakan profil kecepatan dan vektor kecepatan untuk aliran dengan bilangan Reynolds 2×10^5 yang diambil pada jarak 2D sebelum aliran melewati *elbow*. Profil aliran terlihat sudah mencapai kondisi dimana bentuk dari profil simetris antara sisi atas dan bawah *centerline* dikarenakan belum terpengaruh *elbow* dan *valve*. Vektor kecepatan yang ditampilkan juga semakin meyakinkan aliran pada daerah tersebut merupakan daerah yang tidak terpengaruh adanya suatu pengganggu, hal ini terlihat dari arah kecepatan aliran yang dominan ke arah sumbu Y menuju *elbow* dan tidak terlihat adanya secondary flow maupun vektor aliran tegak lurus dengan *streamwise*. Profil dan vektor dalam Gambar 4.4 digunakan sebagai perbandingan terhadap profil dan vektor kecepatan pada *downstream* untuk menentukan aliran pada domain tersebut sudah mencapai *fully recovery*, yaitu apabila profil dan vektor kecepatan dari aliran yang telah terpengaruh oleh *elbow* dan *valve* sudah kembali ke profil dan vektor sebelum aliran melewati *elbow* maupun *valve*.

4.2.1. Profil Kecepatan Valve 0° pada Sumbu Vertikal dan Horizontal

Perbandingan profil kecepatan untuk aliran dengan bilangan Reynolds 2×10^5 dengan kondisi *valve* terbuka penuh ditampilkan dalam Gambar 4.5 pada posisi $x/D=0, 2, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13$, dan 15 yang diambil pada bagian tengah penampang memanjang pipa. Pada $x/D=0$ atau *outlet* dari *elbow* untuk *valve* pada $\alpha=0^\circ$ (terbuka penuh) baik secara vertikal maupun horizontal memiliki profil kecepatan yang sama, aliran setelah melewati *valve* pada $x/D=2$ memiliki perbedaan kecepatan untuk kedua posisi *valve* pada sisi sejajar *outer outlet elbow* dimana pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal memiliki kecepatan lebih tinggi karena tidak mengalami hambatan pada sisi sejajar *inner* maupun *outer outlet elbow* sebagaimana pada *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal. Perkembangan profil kecepatan pada $x/D=3$ hingga $x/D=15$ untuk masing-masing posisi *valve* memiliki kecenderungan yang sama, yaitu peningkatan kecepatan pada sisi sejajar *inner outlet elbow*, dan penurunan kecepatan pada sisi sejajar *outer outlet elbow*. Profil kecepatan untuk *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal pada $x/D=13$ lebih teratur bila dibandingkan dengan *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal dikarenakan pada *valve* yang dipasang pada sumbu

vertikal pengaruh dari *secondary flow* yang diakibatkan oleh *elbow* dan *blockage effect* dari *valve* pada akhir *downstream* lebih besar.

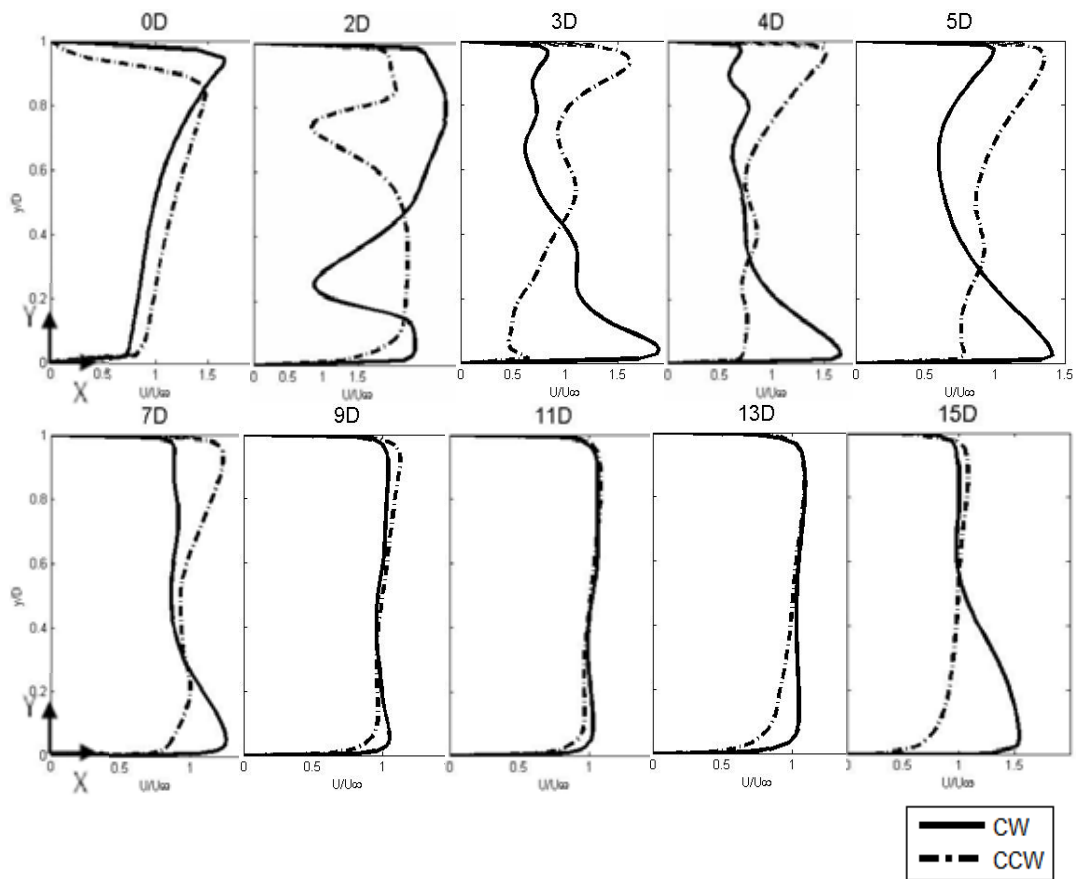


Gambar 4.5 Perbandingan profil kecepatan *valve* terbuka penuh pada $Re\ 2 \times 10^5$

4.2.2. Profil Kecepatan pada *Valve* 30° CW dan 30° CCW

Profil kecepatan pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=30^\circ$ CW dan $\alpha=30^\circ$ CCW ditampilkan dalam Gambar 4.6 untuk bilangan Reynolds 2×10^5 dimana pada *outlet elbow* sudah terpengaruh oleh arah bukaan *valve*. Pada saat $x/D=0$ untuk arah sejajar *inner elbow* menunjukkan *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW memiliki kecepatan lebih tinggi pada daerah dekat dengan dinding pipa, hal ini dikarenakan *blockage effect* yang terjadi pada daerah ini lebih besar. Profil pada $x/D=2$ menunjukkan percepatan yang diakibatkan oleh efek *nozzle* dan *diffuser* pada masing-masing arah bukaan *valve*, dimana kecepatan lebih tinggi pada daerah yang mengalami efek *nozzle*. Perkembangan profil kecepatan untuk

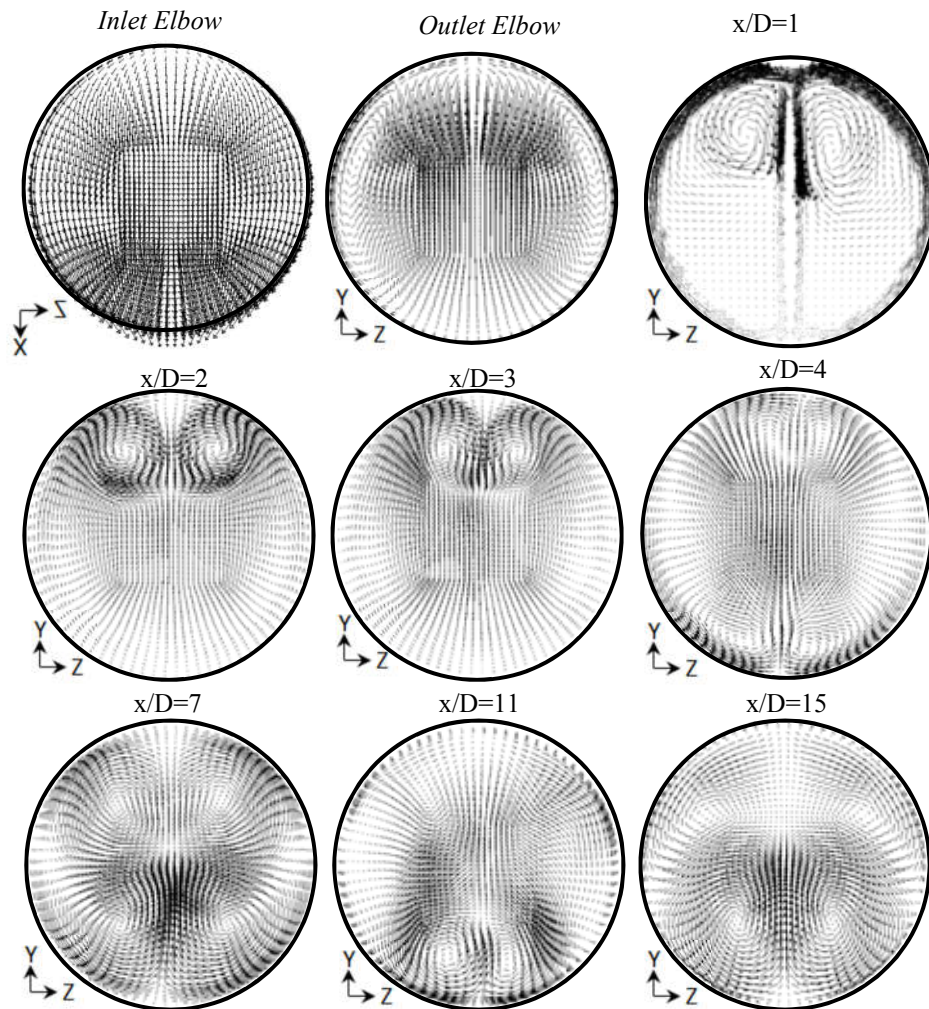
$x/D=3$ hingga $x/D=13$ memiliki kecenderungan yang sama namun berkebalikan, yaitu peningkatan kecepatan pada arah sejajar *inner outlet elbow* dan penurunan kecepatan pada arah sejajar *outer outlet elbow* untuk *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW, hal sebaliknya terjadi pada *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW dimana peningkatan kecepatan terjadi pada arah sejajar *outer outlet elbow*. Pengaruh dari *secondary flow* dan *blockage effect* masih terlihat hingga $x/D=15$, namun untuk *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW pengaruhnya masih lebih besar dibandingkan dengan $\alpha=30^\circ$ CCW, sehingga aliran untuk kedua posisi *valve* belum mencapai *fully recovery*.



Gambar 4.6 Perbandingan profil kecepatan *valve* terbuka $\alpha=30^\circ$ pada $Re\ 2 \times 10^5$

4.2.3. Vektor Kecepatan pada Valve 0° pada Sumbu Vertikal dan Horizontal

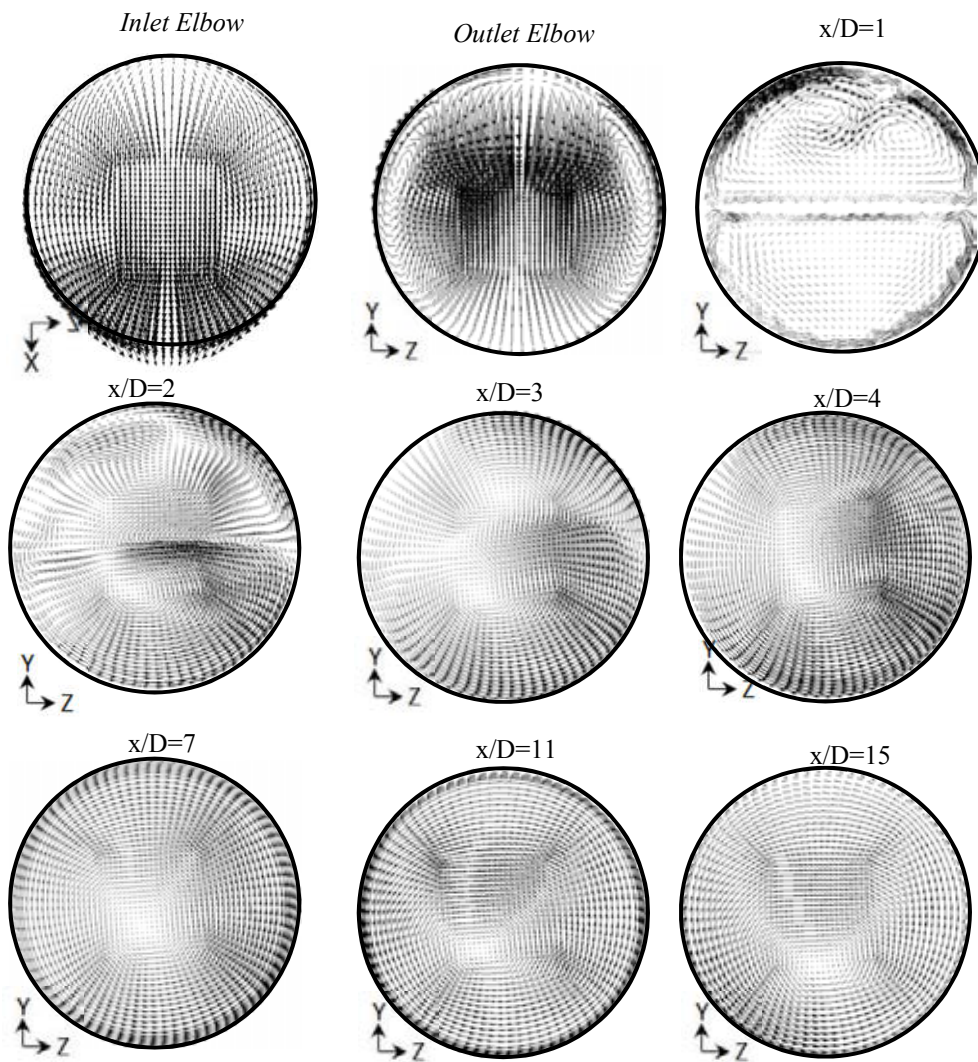
Pada Gambar 4.7 ditampilkan vektor kecepatan untuk aliran dengan bilangan Reynolds 2×10^5 pada valve yang dipasang pada sumbu vertikal dengan $\alpha = 0^\circ$ (terbuka penuh) pada beberapa posisi diantaranya *inlet elbow*, *outlet elbow*, $x/D=1, 2, 3, 4, 7, 11, 15$. Arah aliran pada *inlet elbow* sudah bergerak searah sumbu X positif secara dominan, yaitu menuju *downstream* dari *elbow* hingga pada *outlet elbow* terjadi dua *secondary flow* yang diakibatkan oleh *adverse pressure gradient* pada radius *elbow*. *Secondary flow* ini terjadi pada daerah sekitar *inner elbow* secara simetris pada sumbu Z, ketika aliran melewati valve yang dipasang pada sumbu vertikal pada $x/D=1$ *secondary flow* ini masih terbawa dan semakin kuat bergerak mendekati dinding pipa sejajar *inner outlet elbow* hingga $x/D=3$. Pada $x/D=4$ *secondary flow* mengecil dan membentuk 2 buah *secondary flow* lainnya pada daerah dekat dinding pipa sejajar dengan *outer outlet elbow*, keempat *secondary flow* ini semakin kuat pada $x/D=7$ dan tetap terbawa oleh aliran hingga akhir *downstream* pipa di $x/D=15$. Dengan melihat vektor kecepatan pada akhir *downstream* yang masih terlihat *secondary flow* dengan intensitas yang cukup kuat dan profil kecepatan yang telah dibahas dalam bab sebelumnya, maka dapat disimpulkan dengan panjang *downstream* sebesar $15D$ aliran yang melewati *elbow* dan valve yang dipasang pada sumbu vertikal belum mampu mencapai kondisi *fully recovery*, yaitu kondisi yang sama sebelum aliran melewati *elbow*.



Gambar 4.7 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka penuh secara vertikal pada $Re\ 2 \times 10^5$

Untuk *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=0^\circ$ (terbuka penuh) seperti dalam Gambar 4.8 memiliki vektor kecepatan yang sama dengan *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal pada *inlet* dan *outlet elbow*, dimana keduanya memiliki *secondary flow* yang bergerak mendekati daerah sejajar *inner outlet elbow* pada sisi atas *valve*. Kedua *secondary flow* tersebut bergerak menuju *centerline* kemudian bergabung menjadi satu *secondary flow* pada $x/D=4$ dan terbawa oleh aliran hingga akhir *downstream* dari pipa di $x/D=15$. Dengan vektor kecepatan yang sama pada *upstream*, arah pemasangan *valve* secara vertikal dan horizontal memberikan hasil yang sangat berbeda pada *downstream* dimana *secondary flow* pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal lebih kecil baik jumlah maupun intensitasnya dibandingkan dengan *valve* yang dipasang pada

sumbu vertikal. Dengan masih adanya secondary flow pada akhir *downstream* di $x/D=15$ dan melihat profil kecepatan pada subbab sebelumnya, aliran yang melewati *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan panjang *downstream* $15D$ belum mampu mencapai kondisi *fully recovery*.

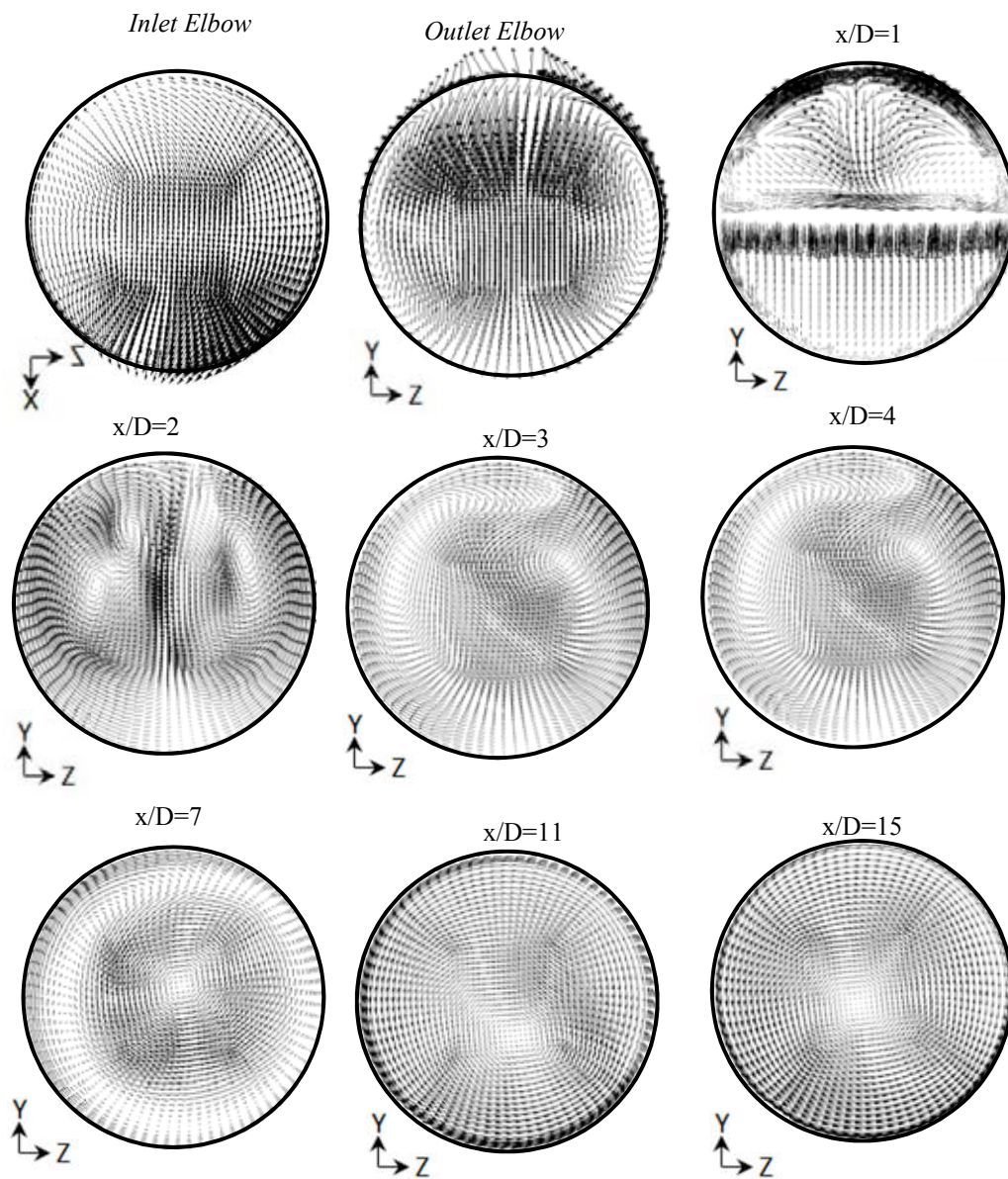


Gambar 4.8 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka penuh secara horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$

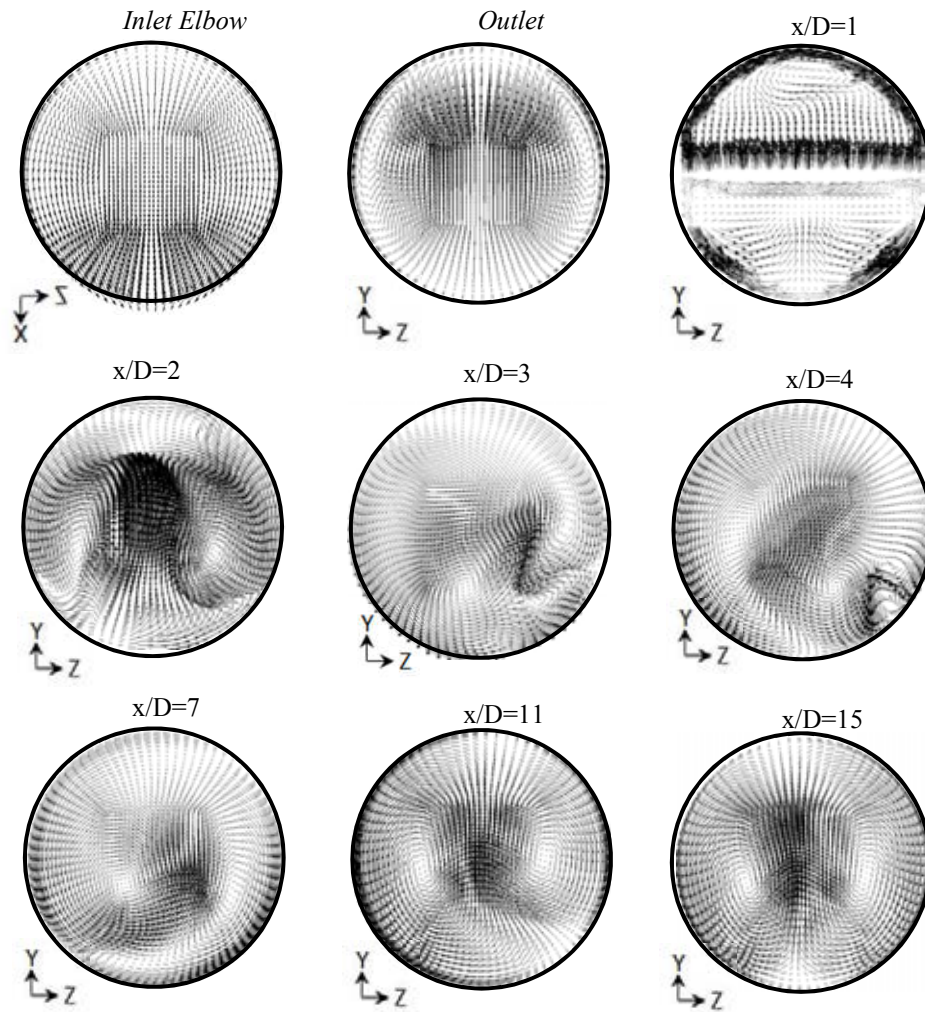
Gambar 4.9 menunjukkan vektor kecepatan dari aliran yang melewati pipa dengan *elbow* 90° dan *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=30^\circ$ CW, untuk vektor pada *inlet elbow* memiliki kesamaan dengan *valve* yang terbuka penuh, baik yang dipasang pada sumbu vertikal maupun horizontal, hal ini berarti arah pemasangan dan bukaan *valve* tidak memberikan pengaruh hingga *inlet*

elbow. Hal yang berbeda terlihat pada *outlet elbow* dimana selain terbentuk *secondary flow* seperti pada penjelasan sebelumnya, juga terlihat arah vektor kecepatannya dominan ke arah sumbu Y positif atau searah bukaan *valve*, fenomena ini ditimbulkan akibat adanya *blockage effect* yang ditimbulkan oleh *valve* yang terbuka ke arah CW sehingga pada sisi sejajar dengan *inner outlet elbow* memiliki *blockage effect* yang lebih besar daripada sisi yang sejajar dengan *outer outlet elbow*. Percepatan yang ditimbulkan oleh *valve* memecah *secondary flow* yang ditimbulkan oleh *elbow* sehingga aliran menjadi tidak beraturan, namun *secondary flow* ini kembali terbentuk pada $x/D=2$ dan bergerak menuju *centerline* hingga menjadi satu *secondary flow* pada $x/D=7$. *Secondary flow* ini terbawa oleh aliran hingga akhir *downstream* dengan intensitas yang relatif tidak berubah hanya lokasinya saja yang berubah, dengan adanya *secondary flow* ini dan melihat profil kecepatan pada subbab sebelumnya maka dengan panjang *downstream* 15D belum mampu mencapai kondisi *fully recovery* pada aliran yang melewati *elbow* dan *valve* yang dibuka dengan $\alpha=30^\circ$ CW.

Pada Gambar 4.10 merupakan vektor kecepatan untuk *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW yang dipasang pada sumbu horizontal, dimana vektor kecepatan pada *inlet* maupun *outlet elbow* memiliki kesamaan dengan *valve* yang terbuka penuh dengan dua *secondary flow* pada *outlet elbow*, namun *secondary flow* ini bergerak menjadi satu di $x/D=1$ pada sisi sejajar *inner outlet elbow* atau di sisi atas *valve*, sedangkan pada sisi bawah *valve* terjadi percepatan aliran akibat *valve* yang dibuka ke arah CCW. Setelah aliran melewati *valve* pada $x/D=2$ terbentuk dua *secondary flow* yang terus berkembang hingga $x/D=11$ dan terbawa hingga akhir *downstream* dengan posisi yang tidak berubah dengan perubahan intensitas yang relatif kecil. Pengaruh *secondary flow* yang masih terdapat pada ujung *downstream* dan bentuk dari profil kecepatan yang telah dibahas sebelumnya menunjukkan bahwa aliran belum mencapai kondisi *fully recovery* pada akhir *downstream* $x/D=15$.



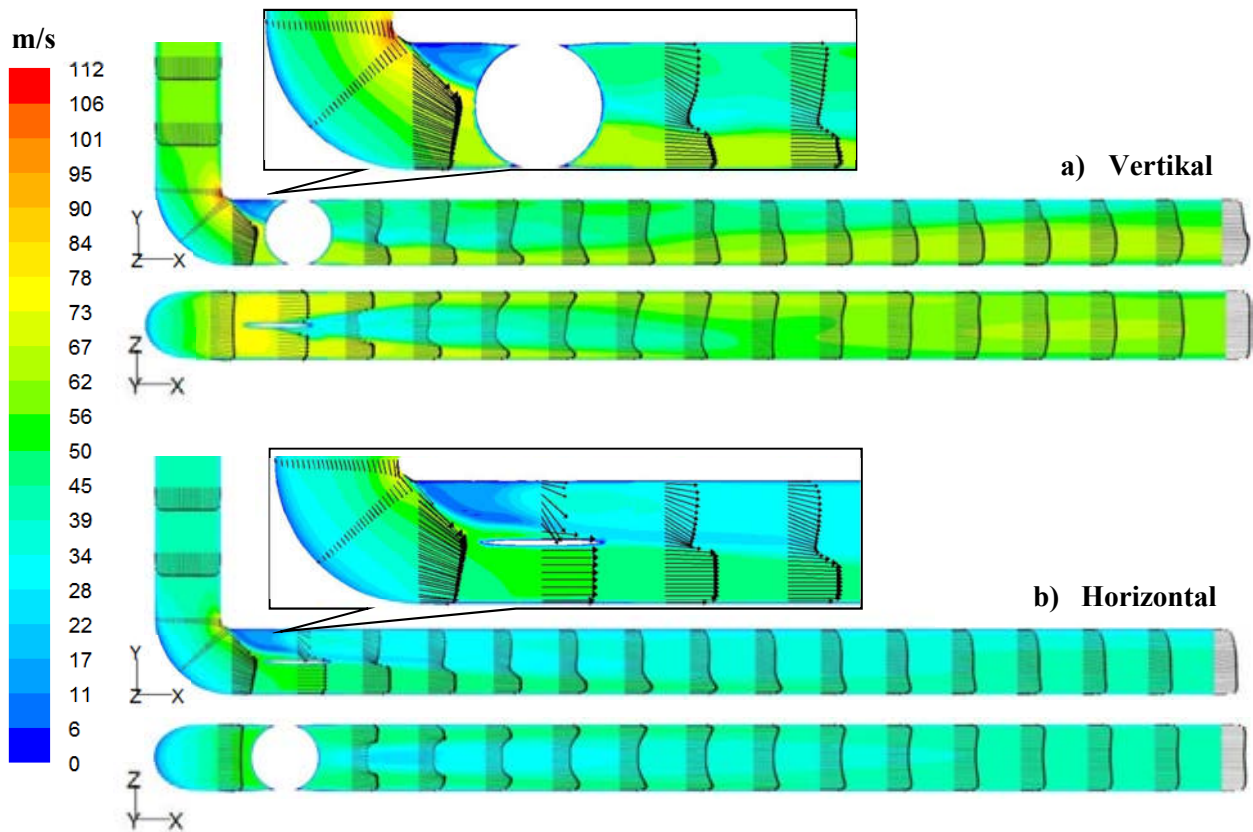
Gambar 4.9 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka $\alpha=30^\circ$ CW pada $Re\ 2 \times 10^5$



Gambar 4.10 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka $\alpha=30^\circ$ CCW pada $Re\ 2 \times 10^5$

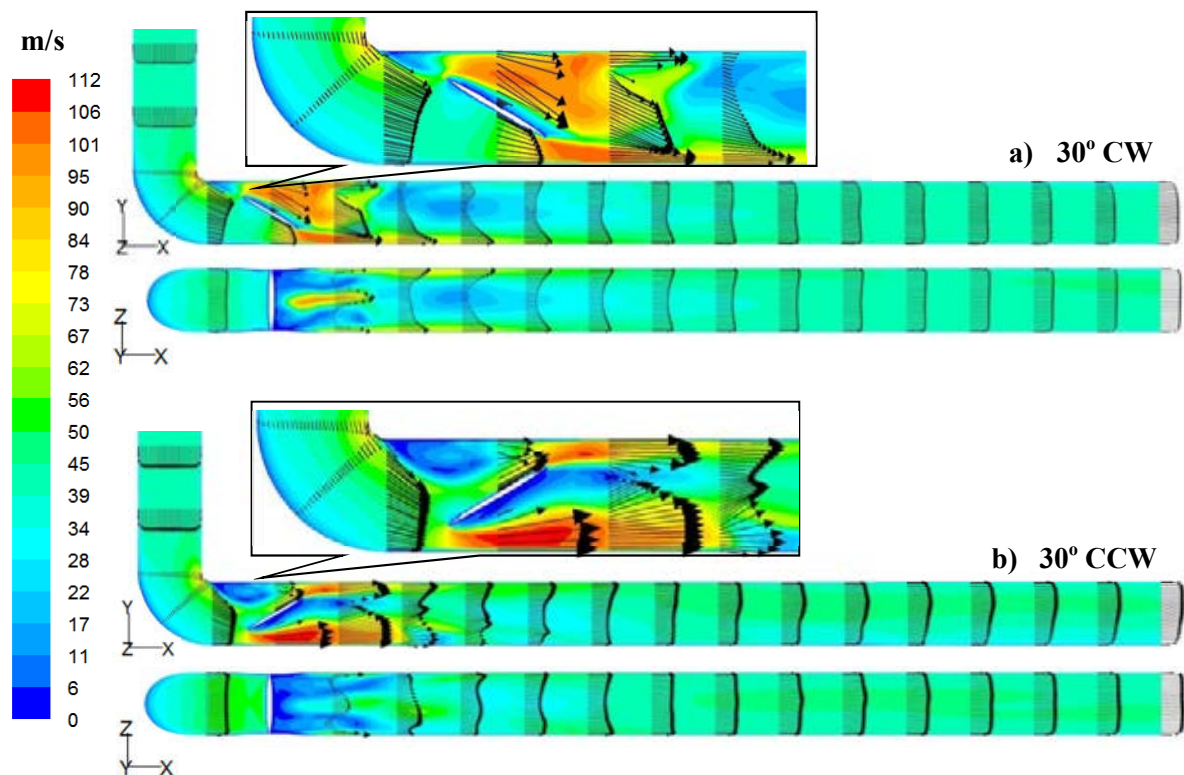
4.3. Karakteristik Aliran pada $Re\ 8 \times 10^5$

Analisa selanjutnya pada subbab ini akan dilakukan pada bilangan Reynolds 8×10^5 dengan kecepatan aliran 40 m/s, hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari bilangan Reynolds terhadap karakteristik aliran melalui kontur kecepatan, vektor kecepatan, dan profil kecepatan pada *downstream* domain simulasi bila dibandingkan dengan bilangan Reynolds yang lebih rendah yaitu 2×10^5 yang telah dibahas sebelumnya.



Gambar 4.11 Kontur dan vektor kecepatan untuk *valve* terbuka penuh pada sumbu vertikal dan horizontal pada $Re\ 8 \times 10^5$

Gambar 4.11 menunjukkan kontur kecepatan dari domain simulasi dengan *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal maupun horizontal, *inlet* masing-masing domain memiliki kecepatan yang sama yaitu 40 m/s hingga *inlet elbow* masih memiliki kontur yang sama. Pada domain dengan *valve* terbuka penuh ($\alpha=0^\circ$) yang dipasang pada sumbu vertikal maupun horizontal memiliki kesamaan pada *outlet elbow* yaitu sebagian besar aliran bergerak ke arah *outer outlet elbow* dengan kecepatan yang lebih tinggi dikarenakan adanya perbedaan tekanan dan energi saat aliran melewati *elbow*, hal ini terbawa hingga aliran melewati *valve* pada $x/D=1$ karena pengaruh *blockage effect* yang ditimbulkan oleh *valve* terhadap aliran relatif kecil.



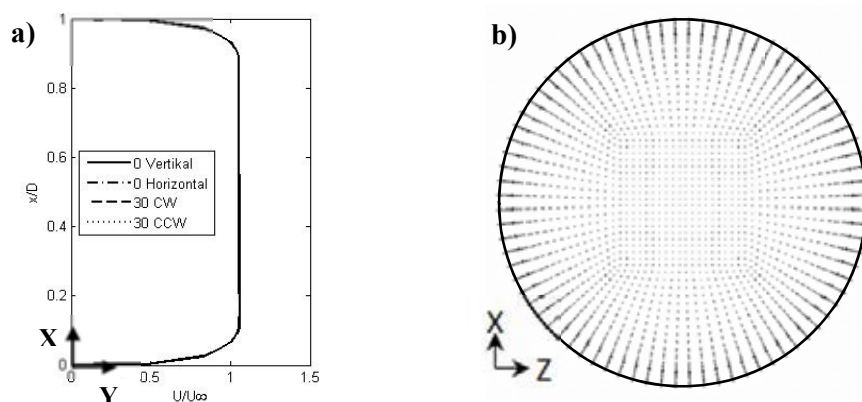
Gambar 4.12 Kontur dan vektor kecepatan untuk *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW dan CCW pada sumbu horizontal pada $Re\ 8 \times 10^5$

Aliran dengan kecepatan 40 m/s memiliki momentum yang lebih besar bila dibandingkan dengan aliran yang memiliki kecepatan 10 m/s, hal ini dapat kita lihat pada perbandingan Gambar 4.2a dan Gambar 4.11a, dimana pada *outlet elbow* memiliki kontur yang sama namun setelah melewati *valve*, aliran yang memiliki kecepatan lebih besar mampu mempertahankan distribusi kecepatannya yaitu untuk sisi sejajar dengan *outer outlet elbow* tetap memiliki kecepatan yang lebih besar hingga akhir *downstream* domain dan penyebaran kecepatannya lebih merata. Hal ini berkebalikan dengan aliran yang memiliki kecepatan lebih rendah dimana setelah aliran melewati *valve* distribusi kecepatan berubah pada daerah sejajar dengan *inner outlet elbow* memiliki kecepatan yang lebih tinggi dan distribusi kecepatannya tidak merata hingga akhir *downstream* domain.

Pada *valve* yang dipasang secara horizontal seperti yang ditampilkan dalam Gambar 4.2b dan Gambar 4.11b hanya memiliki sedikit perbedaan, dimana pada *outlet elbow* memiliki kontur yang sama hingga aliran memasuki *upstream valve*, dengan kecepatan yang lebih tinggi aliran memiliki momentum yang lebih besar

untuk mempertahankan kecepatannya terhadap *blockage effect* yang ditimbulkan oleh *valve*, hal ini terlihat pada aliran setelah melewati *valve* dengan kecepatan yang lebih tinggi distribusi kecepatannya pada sisi sejajar *outer outlet elbow* lebih tinggi pada daerah yang lebih dekat dengan dinding, namun hingga akhir *downstream* di $x/D=15$ distribusi kecepatannya belum merata sehingga aliran belum mencapai *fully recovery*.

Gambar 4.12a merupakan kontur dari *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW pada kecepatan aliran 40 m/s yang menunjukkan kesamaan kontur dengan aliran yang memiliki kecepatan lebih rendah dalam Gambar 4.3a dimana terjadi efek *nozzle* pada sisi sejajar *inner outlet elbow* yang memecah *secondary flow* yang ditimbulkan oleh *elbow*, sehingga pada *downstream valve* memiliki perbedaan kecepatan yang tidak signifikan antara sisi sejajar *inner* dan *outer outlet elbow*. Distribusi kecepatan hingga akhir *downstream* belum merata, sehingga aliran belum mencapai *fully recovery* pada $x/D=15$. Untuk aliran pada *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW dalam Gambar 4.3b dan Gambar 4.12b memiliki kesamaan kontur yaitu setelah aliran melewati *valve* pada daerah sejajar *inner outlet elbow* memiliki kecepatan yang lebih tinggi karena percepatan aliran pada *downstream valve* yang diakibatkan oleh bukaan ke arah CCW terjadi pada daerah ini, hal sebaliknya terjadi pada sisi sejajar *outer outlet elbow* dimana memiliki kecepatan yang lebih rendah dengan perbedaan yang signifikan sehingga hingga akhir *downstream* di $x/D=15$ aliran belum mencapai *fully recovery*.

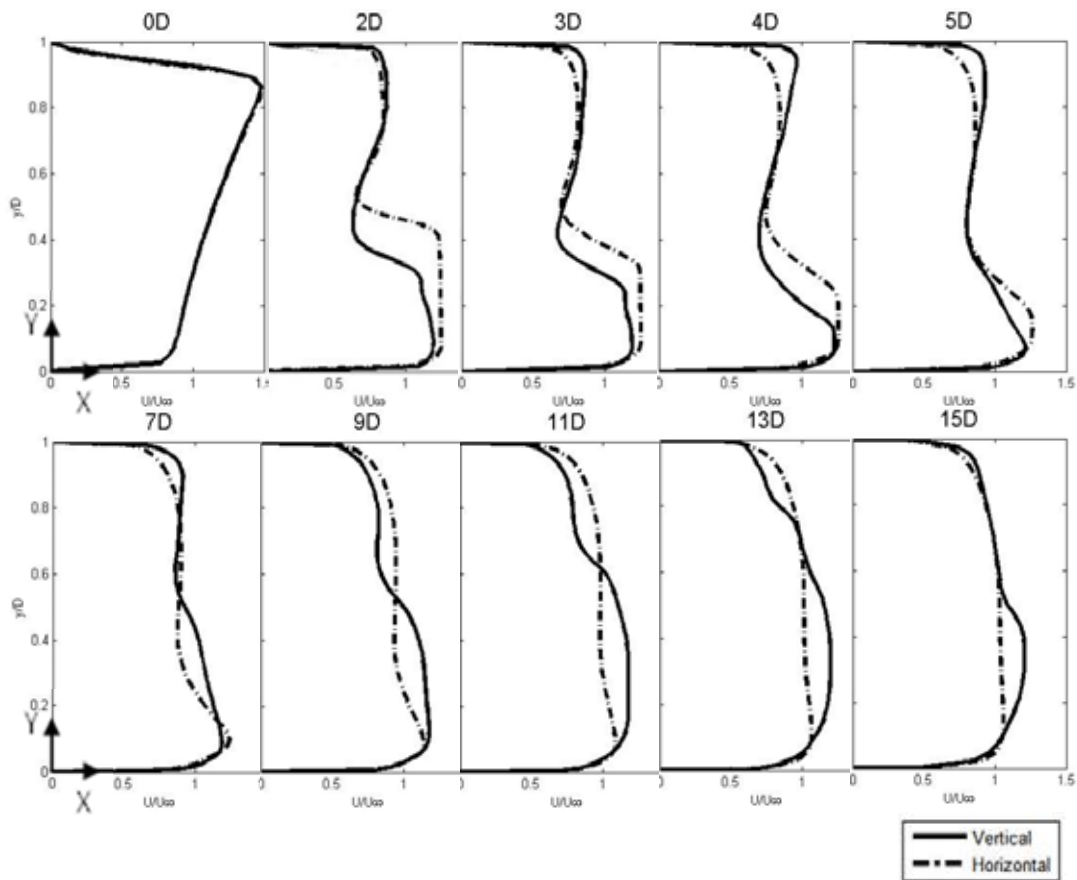


Gambar 4.13 Kondisi aliran dengan $Re\ 8 \times 10^5$ pada jarak 2D sebelum melewati elbow a) profil kecepatan, b) vektor kecepatan

Gambar 4.13 merupakan profil kecepatan dan vektor kecepatan untuk aliran dengan bilangan Reynolds 8×10^5 yang diambil pada jarak 2D sebelum aliran melewati *elbow*. Profil aliran terlihat sudah mencapai kondisi dimana bentuk dari profil simetris antara sisi atas dan bawah *centerline* dikarenakan belum terpengaruh *elbow* dan *valve*. Vektor kecepatan yang ditampilkan juga semakin meyakinkan aliran pada daerah tersebut merupakan aliran yang tidak terpengaruh oleh pengganggu, hal ini terlihat dari arah kecepatan aliran yang dominan ke arah sumbu Y menuju *elbow* dan tidak terlihat adanya *secondary flow* maupun vektor aliran tegak lurus dengan *streamwise*. Profil dan vektor dalam Gambar 4.13 digunakan sebagai perbandingan terhadap profil dan vektor kecepatan pada *downstream* pada aliran dengan bilangan Reynolds 8×10^5 untuk menentukan aliran pada domain tersebut sudah mencapai *fully recovery*, yaitu apabila profil dan vektor kecepatan dari aliran yang telah terpengaruh oleh *elbow* dan *valve* sudah kembali ke profil dan vektor sebelum aliran melewati *elbow* maupun *valve*.

4.3.1. Profil Kecepatan pada Valve 0° pada Sumbu Vertikal dan Horizontal

Pada subbab ini akan dilakukan analisa terhadap profil kecepatan dari aliran yang melewati *elbow* dan *valve* yang dibuka secara penuh, baik yang dipasang pada sumbu vertikal maupun horizontal. Gambar 4.14 menunjukkan profil kecepatan pada *downstream* domain untuk beberapa posisi, profil kecepatan aliran pada *outlet elbow* menunjukkan kesamaan antara *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal maupun horizontal, profil yang sama juga ditunjukkan oleh aliran yang memiliki kecepatan lebih rendah seperti dalam Gambar 4.5, perbedaan mulai terlihat setelah aliran melewati *valve* pada $x/D=2$ dimana perbedaan kecepatan antara daerah sejajar *inner* dan *outer outlet elbow* pada aliran dengan kecepatan 40 m/s tidak signifikan bila dibandingkan aliran dengan kecepatan 10 m/s, hal ini dikarenakan dengan kecepatan yang lebih tinggi aliran memiliki momentum yang lebih besar untuk melawan *blockage effect* yang ditimbulkan oleh *valve*.



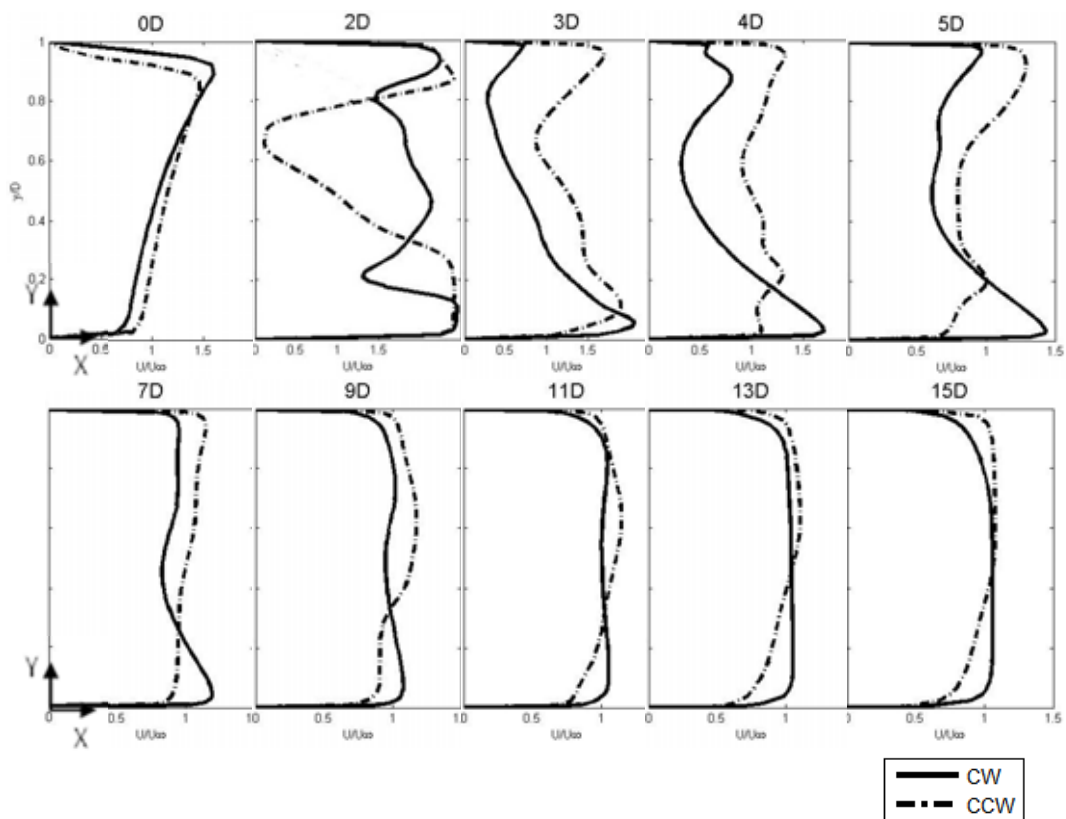
Gambar 4.14 Perbandingan profil kecepatan *valve* terbuka penuh pada $Re \times 10^5$

Perbedaan distribusi kecepatan untuk kedua posisi *valve* pada *downstream valve* masih tetap sama dengan aliran yang memiliki kecepatan lebih rendah, yaitu aliran pada sisi sejajar *outer outlet elbow* untuk *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal memiliki kecepatan yang lebih tinggi karena tidak mengalami *blockage effect* sebagaimana *valve* yang dipasang secara vertikal, walaupun demikian profil kecepatan kedua aliran dengan pemasangan *valve* pada sumbu vertikal maupun horizontal hingga akhir *downstream* di $x/D=15$ belum mencapai *fully recovery*, namun untuk *valve* yang dipasang secara horizontal sudah mendekati *recovery*.

4.3.2. Profil Kecepatan pada *Valve* 30° CW dan 30° CCW

Profil kecepatan untuk aliran dengan kecepatan 40 m/s dan *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=30^\circ$ CW maupun CCW ditampilkan dalam Gambar 4.15. Secara umum profil kecepatan tersebut memiliki persamaan

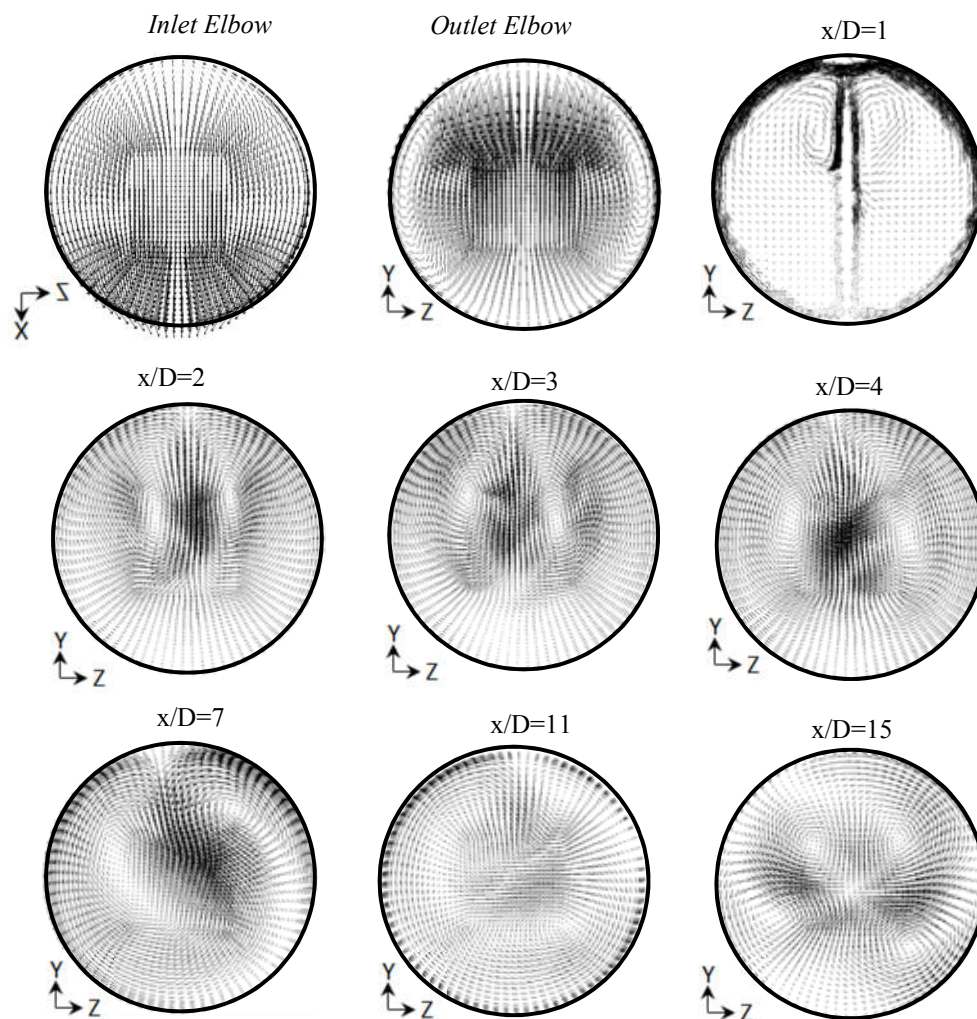
dengan Gambar 4.6, dimana pada *outlet elbow* sudah terpengaruh oleh *valve*. Pada $x/D=2$ terlihat adanya percepatan untuk masing-masing arah bukaan, untuk $\alpha=30^\circ$ CW akselerasi terjadi pada sisi sejajar *inner outlet elbow* sedangkan untuk $\alpha=30^\circ$ CCW akselerasi terjadi pada sisi sejajar *outer outlet elbow*. Perkembangan profil kecepatan pada $x/D=3$ hingga $x/D=5$ pada *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW mengalami peningkatan kecepatan pada sisi sejajar *outer outlet elbow* dan pengurangan kecepatan pada sisi sebaliknya, *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW pada sisi sejajar *outer outlet elbow* terjadi penurunan kecepatan namun pada *centerline* hingga sisi sejajar *inner outlet elbow* terjadi peningkatan kecepatan. Profil kecepatan untuk kedua posisi *valve* mulai mendekati *fully recovery* pada $x/D=15$ dengan kecenderungan yang sama namun berkebalikan, hal ini dikarenakan *blockage effect* dari *valve* cukup kuat sehingga pengaruhnya hingga akhir *downstream* masih kuat.



Gambar 4.15 Perbandingan profil kecepatan *valve* terbuka 30° pada $Re\ 8 \times 10^5$

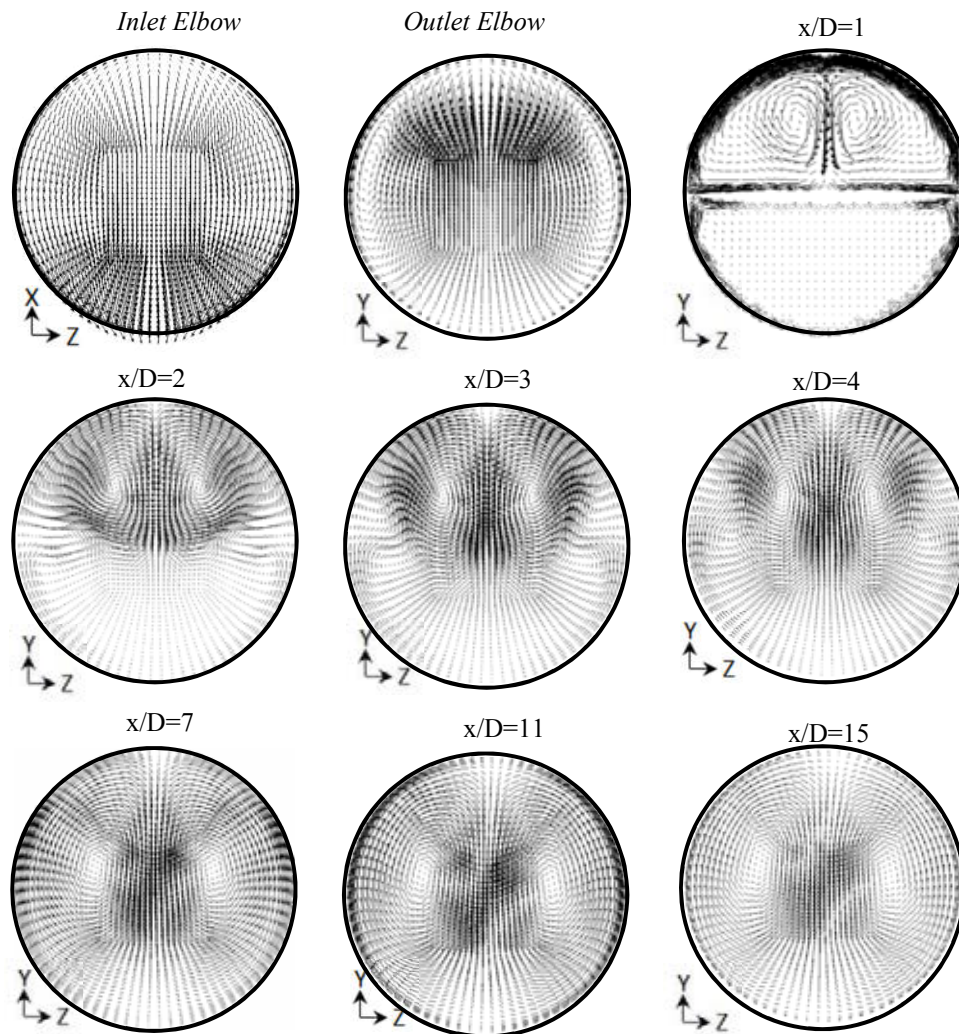
4.3.3. Vektor Kecepatan pada Valve 0° Vertikal dan Horizontal

Untuk menganalisa *secondary flow* yang ditimbulkan oleh *elbow* pada domain dengan *valve* terbuka penuh yang dipasang pada sumbu vertikal dapat dilihat melalui vektor kecepatan seperti yang ditampilkan dalam Gambar 4.16. Secara umum vektor kecepatan pada domain dengan *valve* terbuka penuh yang dipasang pada sumbu vertikal memiliki persamaan antara aliran dengan kecepatan 40 m/s dan 10 m/s yang ditampilkan dalam Gambar 4.7 dimana pada *inlet elbow* aliran sudah mengarah ke arah sumbu X positif atau searah radius *elbow*. Pada *outlet elbow* terjadi dua *secondary flow* pada sisi *inner*, *secondary flow* ini terbawa oleh aliran melewati *valve* yang dipasang secara vertikal pada sisi kanan dan kiri pada $x/D=1$.



Gambar 4.16 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka penuh vertikal pada $Re\ 8 \times 10^5$

Pada $x/D=2$ *secondary flow* bergerak ke arah *centerline* dengan intensitas yang semakin kuat hingga $x/D=4$. Intensitas *secondary flow* pada $x/D=7$ mulai berkurang hingga pada $x/D=11$ *secondary flow* berkembang menjadi 4 dan terbawa hingga akhir *downstream* $x/D=15$, sehingga aliran belum mencapai kondisi *fully recovery* pada akhir *downstream*.



Gambar 4.17 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka penuh horizontal pada $Re\ 8 \times 10^5$

Untuk *secondary flow* pada domain dengan *valve* terbuka penuh yang dipasang secara horizontal ditampilkan dalam Gambar 4.17, dimana pada *inlet* maupun *outlet elbow* memiliki persamaan dengan domain yang terpasang *valve* secara vertikal baik arah maupun besar vektor kecepatannya. *Secondary flow* bergerak melewati *valve* pada sisi atas sejajar dengan *inner outlet elbow* dengan

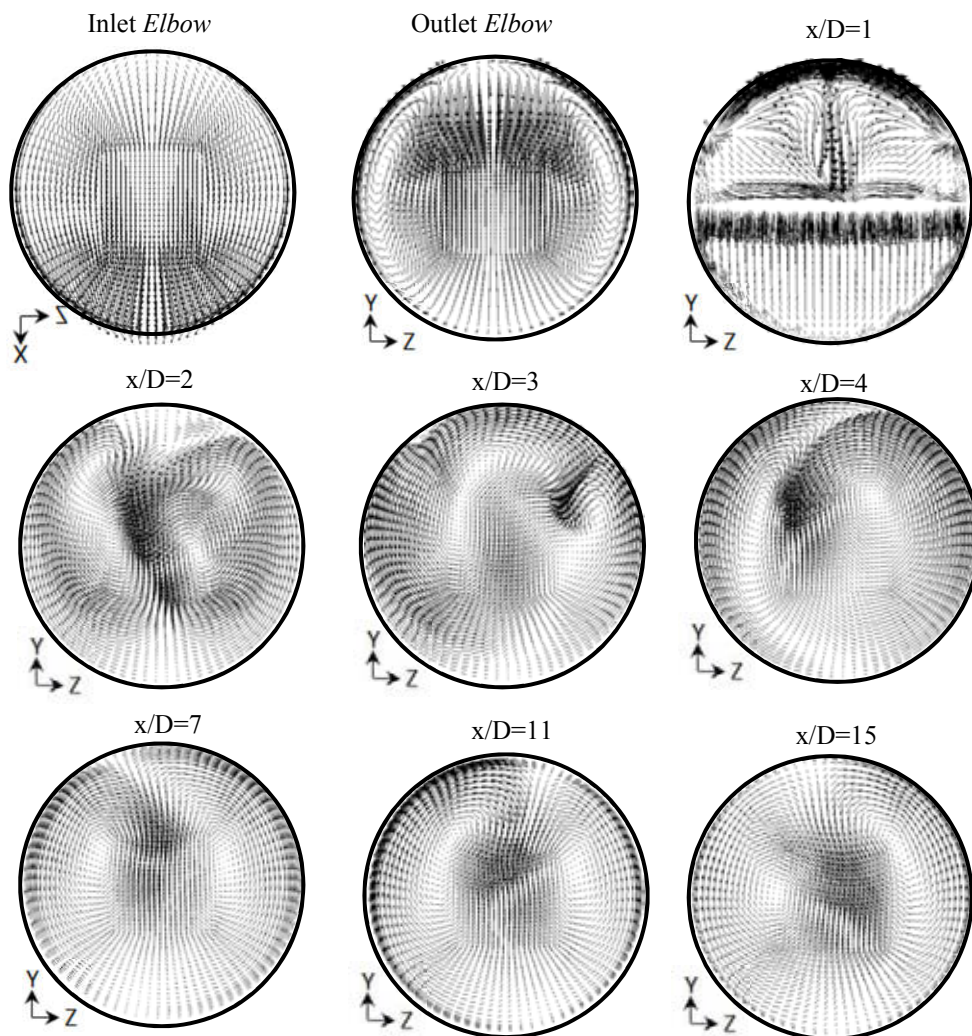
peningkatan intensitas bila dibandingkan pada saat keluar dari *outlet elbow*. Pergerakan *secondary flow* cenderung ke arah *centerline* dengan pengurangan intensitas seiring peningkatan jarak x/D , hingga pada $x/D=7$ sampai $x/D=15$ tidak terdapat perubahan posisi *secondary flow* dan intensitas yang berkurang secara signifikan pada $x/D=15$. Pengaruh *secondary flow* sepanjang *downstream* hingga $x/D=15$ juga terlihat pada profil kecepatan yang telah dibahas sebelumnya, yaitu hingga akhir *downstream* profil aliran belum mencapai *fully recovery*.

4.3.4. Vektor Kecepatan pada Valve 30° CW dan 30° CCW

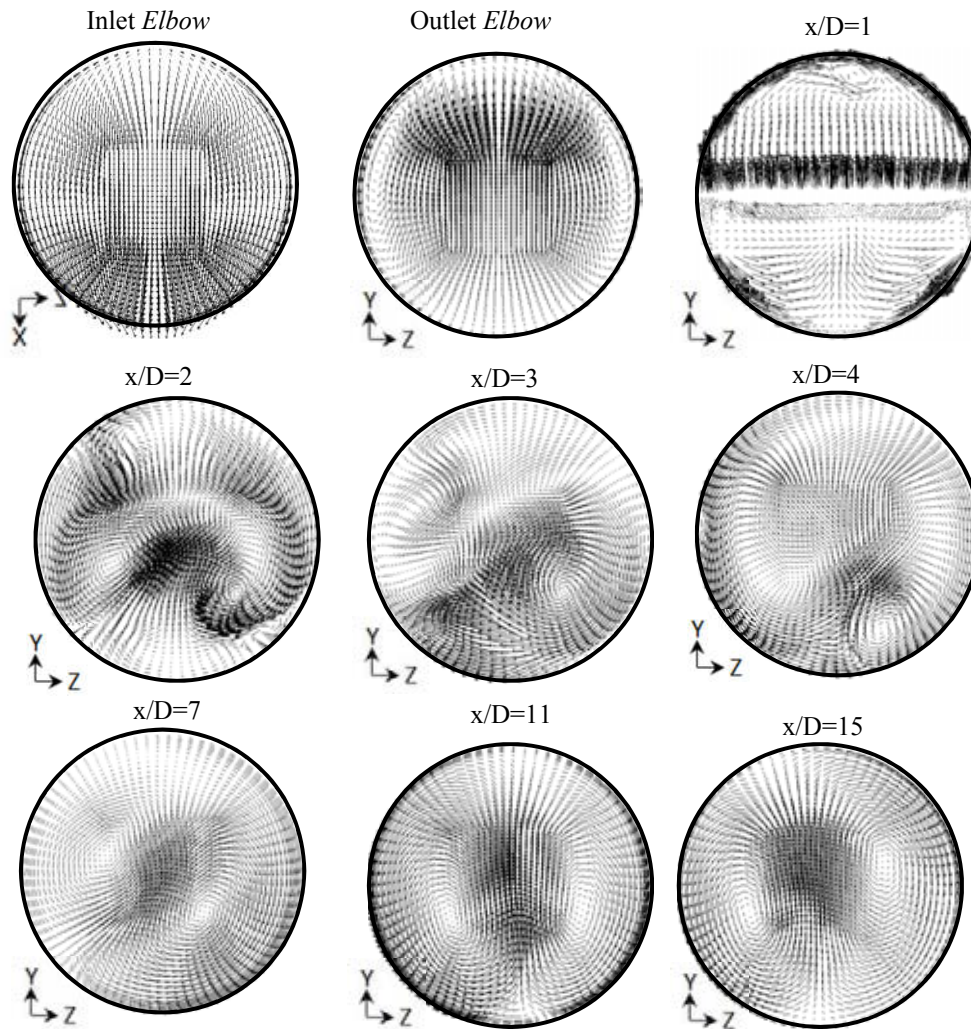
Vektor kecepatan pada aliran dengan kecepatan 40 m/s yang melewati *elbow* dan *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW ditampilkan dalam Gambar 4.18, untuk vektor kecepatan pada *inlet elbow* memiliki kesamaan dengan vektor kecepatan dari posisi *valve* yang sama dengan kecepatan lebih rendah seperti dalam Gambar 4.7 yaitu vektor aliran mengarah ke sumbu X positif searah radius *elbow*, hal ini berarti pengaruh *valve* tidak terjadi hingga *inlet elbow*. Hal yang berbeda terjadi pada *outlet elbow* dimana sebagian vektor dari kecepatan mengarah ke arah Y positif searah *inlet elbow*, hal ini dikarenakan oleh *blockage effect* yang ditimbulkan oleh *valve* yang dibuka ke arah CW dan efek *nozzle* terjadi pada daerah yang berdekatan dengan *inner outlet elbow* sehingga pada sisi ini terdapat aliran yang tertahan. Pada *outlet elbow* terbentuk dua *secondary flow* akibat dari aliran yang melewati *elbow* mengalami *adverse pressure gradient* dimana terjadi kerugian energi kinetik pada aliran dan tekanan pada *outer elbow* lebih tinggi. *Secondary flow* ini terpecah ketika aliran melewati *valve* yang dibuka dengan $\alpha=30^\circ$ CW dan kembali terbentuk *secondary flow* pada $x/D=2$, kemudian berkembang hingga pada $x/D=7$. *Secondary flow* ini terus terbawa oleh aliran hingga akhir *downstream* di $x/D=15$, sehingga aliran tidak mencapai kondisi *recovery* seperti yang ditampilkan oleh profil kecepatan dalam subbab sebelumnya.

Vektor kecepatan untuk aliran pada *valve* yang dibuka ke arah CCW dengan $\alpha=30^\circ$ ditampilkan dalam Gambar 4.19, *valve* yang terbuka ke arah CCW tidak memberikan pengaruh terhadap vektor kecepatan di *inlet* maupun *outlet elbow* dikarenakan pada posisi ini terjadi efek *diffuser* pada sisi sejajar *outer*

outlet elbow. Pada saat aliran melewati *valve*, dua *secondary flow* yang terjadi akibat aliran melewati *elbow* bergerak menjadi satu *secondary flow* yang terletak pada daerah dekat dinding pipa sejajar *inner outlet elbow*, setelah aliran melewati *valve* pada $x/D=2$ kembali terbentuk *secondary flow* yang terus berkembang secara signifikan hingga $x/D=7$, tidak seperti pada *valve* yang dibuka ke arah CW, *secondary flow* ini masih terus berubah posisi maupun intensitasnya hingga akhir *downstream* pada $x/D=15$, sehingga aliran tidak *recovery* pada akhir *downstream* sebagaimana ditunjukkan oleh profil kecepatan dalam subbab sebelumnya.



Gambar 4.18 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka 30° CW pada $Re\ 8 \times 10^5$



Gambar 4.19 Vektor kecepatan pada *valve* terbuka 30° CCW pada $Re\ 8 \times 10^5$

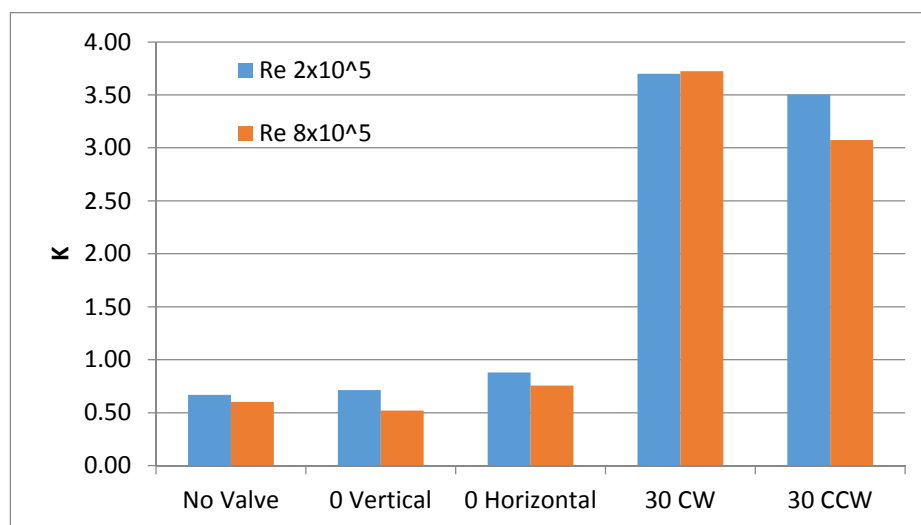
4.4. *Pressure Drop*

Penurunan tekanan yang terjadi dalam aliran yang melalui *elbow* dan *butterfly valve* dinyatakan menggunakan bilangan tak berdimensi *pressure losses coefficient* (K) seperti yang dinyatakan dalam persamaan 2.4, yaitu perbandingan perbedaan tekanan antara inlet dan outlet dibandingkan dengan energi kinetik yang dimiliki oleh aliran. *Pressure drops* yang terjadi pada aliran dalam pipa disebabkan oleh beberapa komponen seperti gesekan dengan dinding pipa, kerugian energi kinetik karena dalam aliran terjadi separasi dan *secondary flow*, dan terjadinya *blockage effect* yang ditimbulkan oleh adanya pengganggu dalam aliran dimana dalam kasus ini adalah *butterfly valve* yang dipasang pada beberapa posisi. Secara umum aliran pada kecepatan 40 m/s memiliki nilai K yang lebih

rendah untuk masing-masing posisi *valve* dibandingkan dengan aliran berkecepatan 10 m/s, hal ini dikarenakan dengan kecepatan yang lebih tinggi aliran memiliki momentum yang lebih besar untuk melawan *blockage effect* yang disebabkan oleh *elbow* dan *valve*.

Tabel 4.1 Tekanan pada *inlet* dan *outlet* pipa

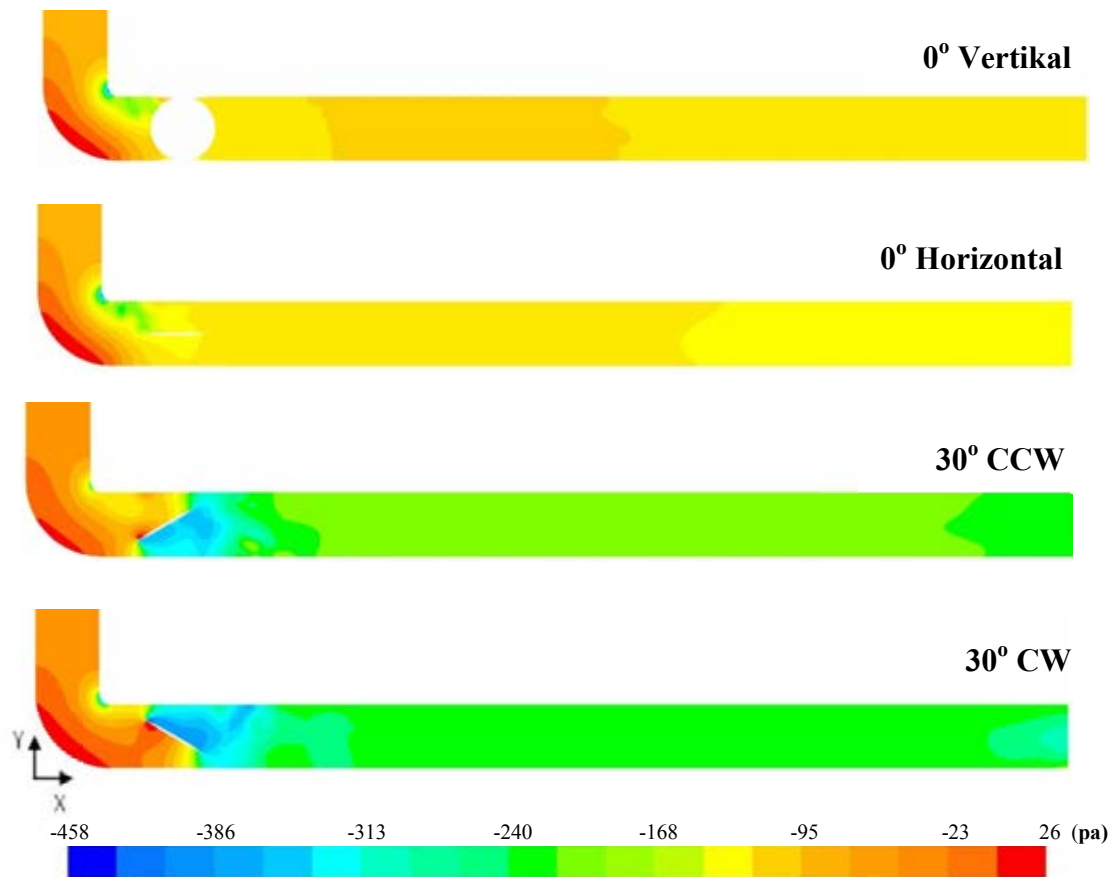
| No. | Re (kecepatan) | Posisi <i>Valve</i> | Δp (pa) | K |
|-----|-----------------------------|---------------------|--------------------|------|
| 1 | 2×10^5 (10 m/s) | Tanpa <i>valve</i> | 40.99 | 0.67 |
| 2 | | 0° Vertical | 43.69 | 0.71 |
| 3 | | 0° Horizontal | 53.85 | 0.88 |
| 4 | | 30° CW | 226.52 | 3.70 |
| 5 | | 30° CCW | 214.49 | 3.50 |
| 6 | 8×10^5 (40 m/s) | Tanpa <i>valve</i> | 588.66 | 0.60 |
| 7 | | 0° Vertical | 509.09 | 0.52 |
| 8 | | 0° Horizontal | 740.96 | 0.76 |
| 9 | | 30° CW | 3647.71 | 3.72 |
| 10 | | 30° CCW | 3012.07 | 3.07 |



Gambar 4.20 Grafik *pressure lossess coefficient* untuk posisi *valve* tertentu

Distribusi tekanan pada inlet *elbow* hingga *downstream* pipa dapat dilihat pada kontur tekanan untuk masing-masing posisi *valve* pada Gambar 4.21 untuk bilangan *Reynolds* 2×10^5 dan Gambar 4.22 untuk bilangan *Reynolds* 8×10^5 . Pada Gambar 4.21 terlihat pada sisi terluar dari radius *elbow* mengalami tekanan terbesar sebagai akibat dari pembelokan aliran oleh *elbow*, hal yang berlawanan terjadi pada sisi *inner* radius *elbow* dimana tekanan pada daerah ini relatif kecil, terutama untuk domain dengan *valve* yang dibuka secara penuh baik yang dipasang pada sumbu vertikal maupun horizontal. Tekanan pada sisi *inner* radius *elbow* untuk domain dengan *valve* yang dibuka pada $\alpha=30^\circ$ baik CW maupun CCW memiliki tekanan yang lebih besar dibandingkan dengan *valve* yang dibuka penuh dikarenakan adanya *blockage effect*. Perbedaan tekanan setelah aliran melewati *valve* tidak mengalami banyak perubahan pada *valve* yang dibuka penuh, hal ini membuktikan *valve* yang dibuka secara penuh tidak memberikan hambatan yang signifikan pada aliran.

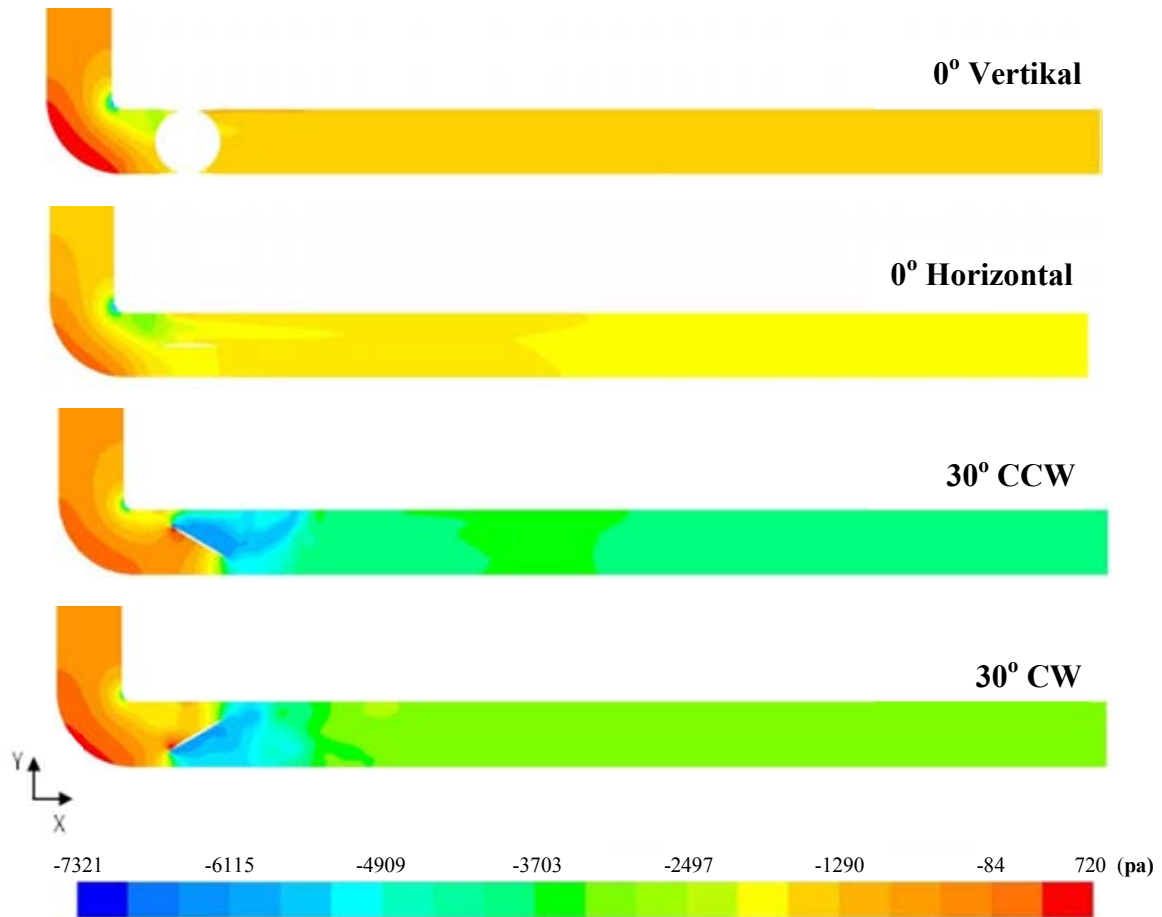
Hal yang berbeda terjadi pada *valve* yang dibuka dengan $\alpha=30^\circ$ CW memiliki hambatan yang lebih besar terhadap tekanan dikarenakan tekanan pada sisi *outer elbow* yang lebih besar memperoleh hambatan dari *valve* secara langsung ketika aliran keluar dari *outlet elbow*, sedangkan pada *valve* yang dibuka ke arah CCW tekanan yang lebih tinggi pada sisi *outer elbow* memiliki waktu untuk bergerak ke arah sejajar *inner outlet elbow* sebelum terhambat oleh *valve*. Distribusi tekanan pada *downstream* pipa setelah aliran melewati *valve* untuk *valve* terbuka penuh memiliki tren yang sama yaitu setelah melewati *valve* terdapat daerah yang memiliki tekanan lebih tinggi, pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal daerah ini lebih luas bila dibandingkan dengan *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal. Hambatan yang diberikan oleh *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ cukup besar, terlihat dari kontur tekanan setelah melewati *valve* berwarna hijau hingga akhir *downstream*, namun distribusi tekanan yang hampir merata dari jarak $x/D=3$ hingga $x/D=15$. Penurunan tekanan pada masing-masing posisi *valve* ditampilkan dalam Tabel 4.1.



Gambar 4.21 Kontur tekanan pada $Re 2 \times 10^5$

Kontur tekanan untuk aliran dengan bilangan *Reynolds* 8×10^5 ditampilkan dalam Gambar 4.22 untuk masing-masing posisi *valve*, dimana pada masing-masing posisi *valve* memiliki tren yang sama dengan aliran yang memiliki kecepatan lebih rendah dalam Gambar 4.21 yaitu pada sisi *outer elbow* memiliki tekanan yang lebih besar dibandingkan dengan sisi *inner elbow*. Aliran yang melewati *valve* terbuka penuh yang dipasang pada sumbu vertikal tidak mengalami hambatan yang signifikan, hal ini terlihat dari distribusi tekanan dari *outlet elbow* kemudian aliran melewati *valve* hingga akhir domain tekanan terdistribusi secara merata. Pada *valve* terbuka penuh yang dipasang pada sumbu horizontal terdapat daerah bertekanan lebih tinggi setelah aliran melewati *valve*, hal ini dikarenakan pergerakan aliran bertekanan lebih tinggi dari *outer elbow* menuju sisi sejajar *inner elbow* terpecah oleh *valve* yang dipasang secara

horizontal, daerah bertekanan lebih tinggi ini bertahan hingga $x/D=7$ sebelum tekanan terdistribusi secara merata hingga akhir domain.



Gambar 4.22 Kontur tekanan pada $Re \times 10^5$

Kontur tekanan pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=30^\circ$ CW memiliki *blockage effect* yang lebih besar dibandingkan dengan *valve* yang dibuka ke arah CCW karena aliran dengan tekanan yang lebih tinggi pada *outer outlet elbow* bergerak menuju sisi sejajar *inner outlet elbow* terhalang secara langsung oleh *valve*, sedangkan pada *valve* yang dibuka ke arah CCW aliran tidak terhalang secara langsung namun memiliki waktu untuk bergerak menuju sisi sejajar *inner outlet elbow* sebelum terhambat oleh *valve* yang dibuka ke arah CCW. Penurunan tekanan yang diakibatkan oleh kedua posisi *valve* memiliki tren yang sama, namun berkebalikan yaitu tekanan terendah (ditandai dengan warna biru tua) terjadi pada *downstream valve* yang mengalami fenomena *nozzle*.

Tekanan pada aliran setelah melewati *valve* terdistribusi secara merata mulai $x/D=4$ hingga akhir *downstream* dari domain. Data mengenai tekanan pada inlet dan *outlet* domain beserta dengan koefisien penurunan tekanannya dapat dilihat dalam Tabel 4.1.

4.5. Diskusi

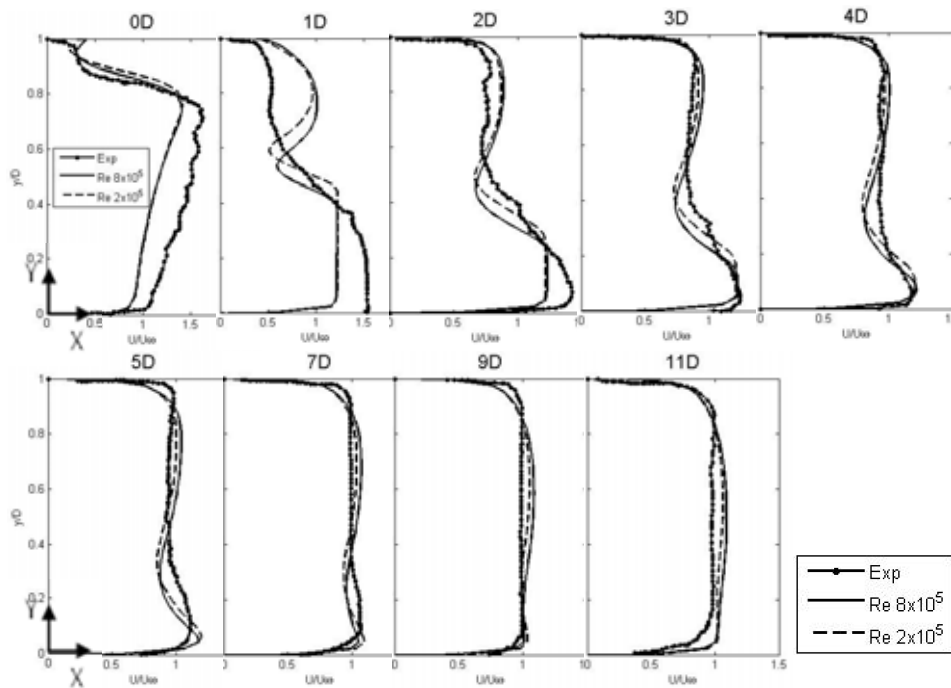
Pada subbab ini akan dilakukan perbandingan beberapa variasi seperti hasil simulasi dengan eksperimen untuk domain yang tidak dilengkapi *valve*, hanya pipa dan *elbow*. Selain itu juga akan dilakukan perbandingan untuk *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan variasi sudut bukaan 0° , 30° CW, dan 30° CCW untuk mengetahui pengaruh dari arah bukaan *valve* terhadap profil aliran pada *downstream*

4.5.1. Perbandingan Simulasi dengan Eksperimen

Perbandingan antara hasil simulasi dengan eksperimen yang dilakukan oleh **Dandon** dan **Sollic** (2000) ditampilkan dalam Gambar 4.23. Secara umum profil kecepatan yang dihasilkan dari kedua metode memiliki kecenderungan yang sama terkait dengan pola dan tren yang dihasilkan yaitu pada sisi *inner outlet elbow* memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sisi *outer outlet elbow*. Pada $x/D=1$ terdapat perbedaan pada kedua profil kecepatan dimana pada simulasi memiliki kecepatan yang lebih rendah pada $y/D=0$ hingga $y/D=0.8$, sedangkan untuk $x/D=2$ profil kecepatan pada simulasi berkembang lebih cepat pada sisi sejajar *inner outlet elbow* sehingga kecepatan pada sisi ini lebih besar daripada profil kecepatan untuk eksperimen, karena kecepatan sudah terdistribusi pada sisi sejajar *inner outlet elbow*, maka kecepatan untuk sisi sejajar *outer outlet elbow* memiliki kecepatan yang lebih rendah dibandingkan dengan hasil eksperimen.

Perkembangan profil kecepatan diantara kedua metode mulai berhimpit pada $x/D=2$ walaupun pada sisi sejajar *outer outlet elbow* masih memiliki perbedaan untuk hasil simulasi memiliki kecepatan yang lebih rendah baik untuk $Re\ 2 \times 10^5$ maupun $Re\ 8 \times 10^5$. Ketiga profil kecepatan memiliki perkembangan yang sama pada $x/D=3$ hingga akhir *downstream* $x/D=11$ dimana pada sisi sejajar

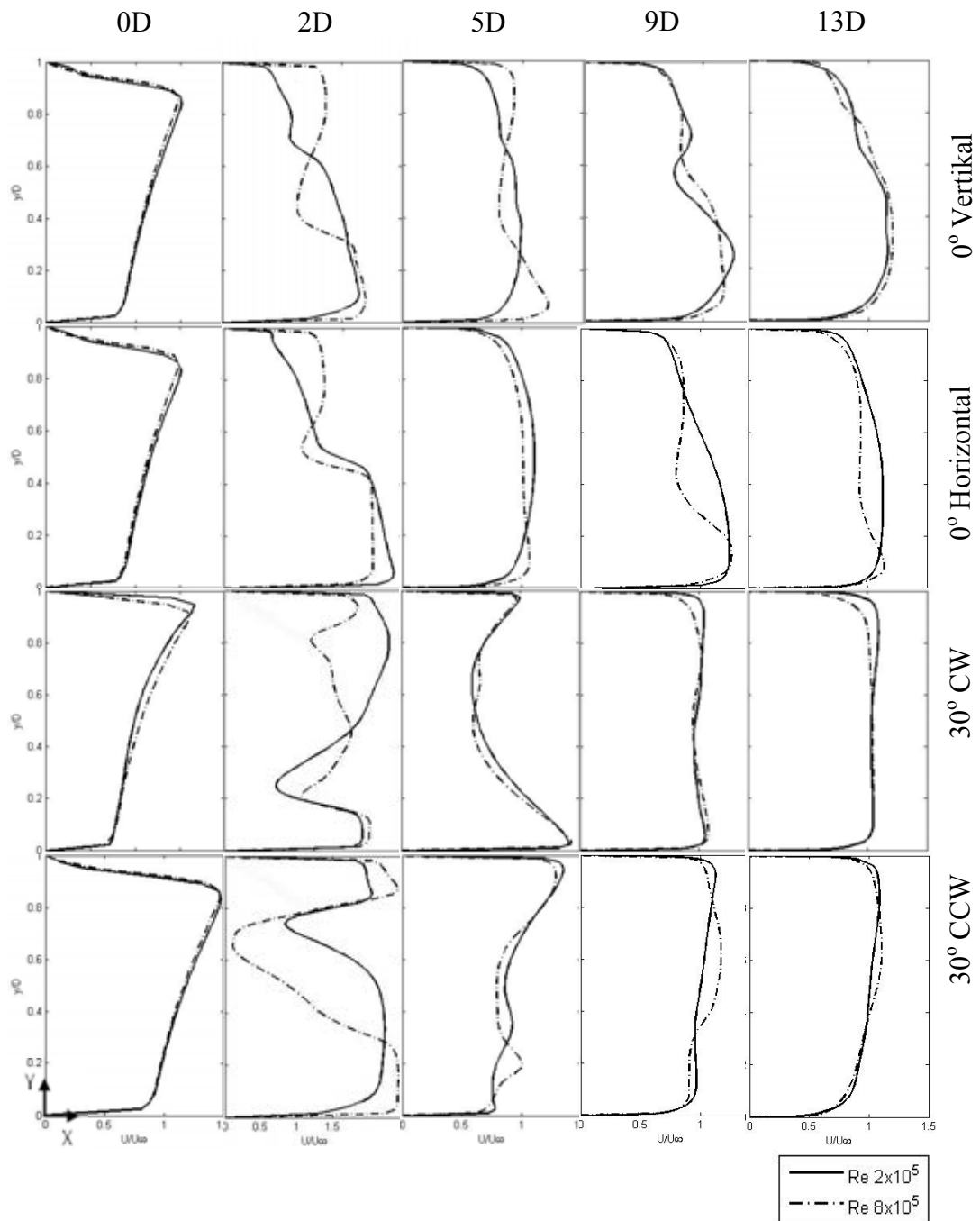
outer outlet elbow distribusi kecepatannya semakin menurun berpindah ke sisi sejajar *inner outlet elbow* hingga kecepatan terdistribusi secara merata sehingga aliran *recovery* mulai $x/D=9$ hingga $x/D=11$.



Gambar 4.23 Perbandingan Profil Kecepatan Pada Pipa Tanpa Valve Antara Simulasi Dengan Eksperimen

4.5.2. Pengaruh Bilangan Reynolds terhadap Profil Kecepatan

Dari simulasi numerik yang telah dilakukan terhadap domain yang terdiri dari pipa, *elbow*, dan *butterfly valve* pada dua bilangan Reynolds yang berbeda yaitu 2×10^5 dengan kecepatan aliran 10 m/s dan bilangan Reynolds 8×10^5 dengan kecepatan 40 m/s akan dilakukan perbandingan berdasarkan perbedaan bilangan Reynolds tersebut untuk mengetahui pengaruhnya terhadap profil kecepatan pada *downstream* domain, dimana aliran telah melewati *elbow* dan *valve*. Perbandingan profil kecepatan tersebut ditampilkan dalam Gambar 4.24, beberapa posisi dipilih untuk membandingkan profil kecepatan pada masing-masing arah bukaan *valve* untuk dua bilangan Reynolds yang berbeda yaitu pada $x/D=0, 2, 5, 9$, dan 13.



Gambar 4.24 Pengaruh Bilangan Reynolds Terhadap Profil Kecepatan

Untuk $x/D=0$ yang tepat berada pada *outlet elbow* terlihat tidak terdapat pengaruh dari bilangan Reynolds terhadap profil kecepatan aliran, baik untuk *valve* yang dibuka penuh maupun *valve* yang dibuka dengan $\alpha=30^\circ$ CW maupun CCW, dari keempat profil kecepatan yang ditampilkan menunjukkan tren yang sama dan berhimpit antara bilangan Reynolds rendah dan tinggi. Hal ini

membuktikan tidak adanya pengaruh bilangan Reynolds terhadap profil aliran yang melewati *elbow*, fenomena ini sesuai dengan eksperimen yang dilakukan oleh **Dutta** dan **Nandi** (2015). Setelah aliran melewati *valve* yang diatur pada beberapa posisi, profil aliran dilihat pada $x/D=2$ dimana pada bilangan Reynolds yang lebih tinggi profil aliran terdistribusi hampir sama untuk sisi sejajar *inner* dan *outer outlet elbow* namun memiliki kecepatan yang lebih rendah pada daerah *centerline* untuk *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal, sedangkan untuk bilangan Reynolds yang lebih rendah pada daerah sejajar *outer outlet elbow* memiliki kecepatan yang lebih tinggi dengan penurunan kecepatan ke arah sisi sejajar *inner outlet elbow* secara teratur dan berkembang terus dengan peningkatan kecepatan pada sisi sejajar *inner elbow* hingga $x/D=13$. Perkembangan profil kecepatan untuk bilangan Reynolds 8×10^5 mulai dari $x/D=5$ hingga $x/D=13$ lebih didominasi peningkat kecepatan pada sisi sejajar *outer outlet elbow* dan *centerline*, kedua profil kecepatan hingga akhir *downstream* belum *recovery* karena pengaruh dari *secondary flow* masih cukup kuat.

Untuk aliran melewati *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal pada $x/D=2$ menunjukkan tren yang sama dengan *valve* yang dipasang pada sumbu vertikal, sedangkan pada $x/D=5$ hingga $x/D=13$ profil kecepatan dari kedua bilangan Reynolds mulai berhimpit dan tidak terdapat perbedaan yang signifikan. Pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=30^\circ$ CW, pengaruh dari bilangan Reynolds hanya terjadi pada daerah $x/D=2$, dimana aliran baru saja melewati *valve*. Untuk bilangan Reynolds yang lebih rendah kecepatan terdistribusi pada daerah sejajar *inner outlet elbow* lebih tinggi daripada sisi sejajar *outer*, pada bilangan Reynolds yang lebih tinggi kecepatan pada daerah sejajar *inner outlet elbow* memiliki kecepatan yang rendah, hal ini dikarenakan *blockage effect* yang dialami aliran dengan bilangan Reynolds yang lebih tinggi lebih besar. Pada $x/D=5$ profil kecepatan aliran dari kedua bilangan Reynolds sudah berhimpit hingga akhir *downstream*.

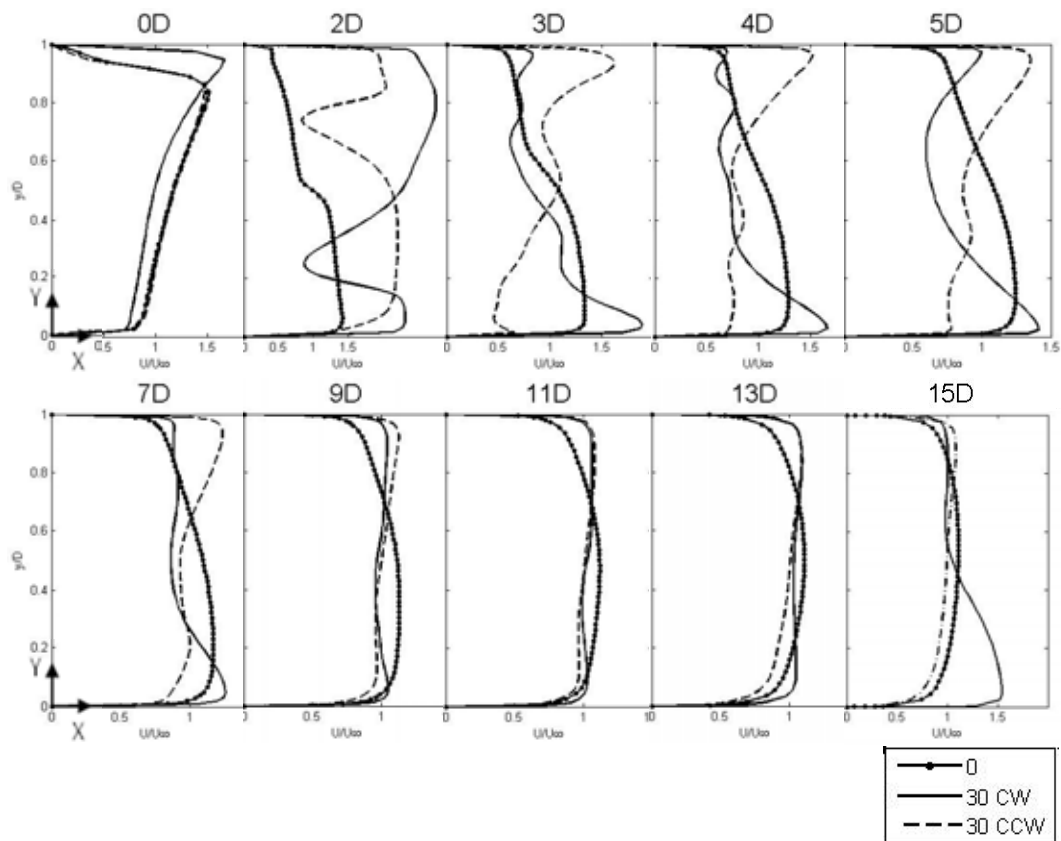
Pada *valve* dipasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=30^\circ$ CCW untuk daerah $x/D=2$ dimana aliran telah melewati *valve* memiliki bentuk profil kecepatan yang hampir sama, dimana untuk bilangan Reynolds yang lebih rendah distribusi kecepatan pada daerah *centerline* lebih tinggi daripada aliran dengan

bilangan Reynolds yang lebih tinggi, hal ini dikarenakan *blockage effect* yang lebih besar pada aliran dengan kecepatan yang lebih tinggi. Kedua profil kecepatan muai berhimpit pada $x/D=5$ dengan perbedaan yang tidak signifikan dan pada $x/D=13$ kedua profil aliran sudah berhimpit.

Dari analisa Gambar 4.24 Pengaruh Bilangan Reynolds Terhadap Profil Kecepatan menunjukkan pengaruh dari bilangan Reynolds tidak memberikan efek yang signifikan terhadap profil aliran setelah melewati *elbow*. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh **Dutta** dan **Nandi** (2015) yang menyatakan pengaruh dari bilangan Reynolds untuk aliran yang melewati *elbow* dengan radius kecil kurang dari 1D tidak signifikan, pengaruh dari bilangan Reynolds akan signifikan apabila aliran melewati *elbow* dengan radius besar lebih dari 1D. Pada Gambar 4.24 Pengaruh Bilangan Reynolds Terhadap Profil Kecepatan terlihat bilangan Reynolds berpengaruh terhadap aliran ketika melewati valve untuk semua posisi *valve* pada posisi $x/D=2$, untuk valve yang terbuka penuh pengaruh dari bilangan Reynolds bertahan hingga akhir *downstream*. Untuk valve yang dibuka dengan $\alpha=30^\circ$ pengaruh bilangan *valve* tidak signifikan dan tidak terbawa hingga akhir *downstream*.

4.5.3. Perbandingan Valve pada Sumbu Horizontal dengan $\alpha=0^\circ$, 30° CW, dan 30° CCW

Pada subbab ini akan dilakukan perbandingan arah bukaan *valve* terhadap profil dan vektor kecepatan pada daerah *downstream* domain. Perbandingan dilakukan pada *valve* yang terpasang pada sumbu horizontal dengan $\alpha=0^\circ$, 30° CW, dan 30° CCW dengan bilangan Reynolds 2×10^5 .

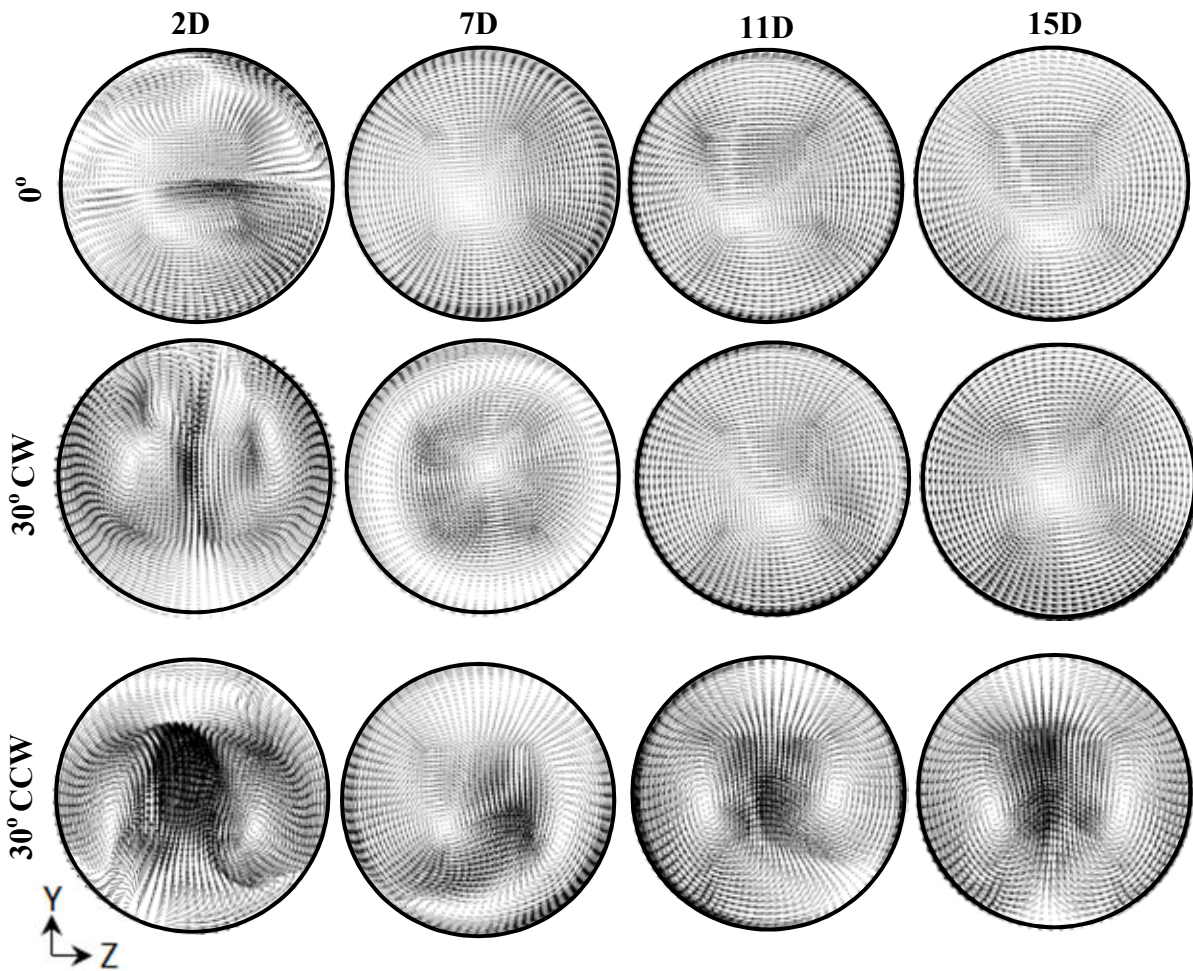


Gambar 4.25 Perbandingan profil kecepatan pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$

Perbandingan profil kecepatan ditampilkan dalam Gambar 4.25, dimana pada $x/D=0$ atau *outlet elbow valve* yang dibuka dengan $\alpha=30^\circ$ CW memberikan pengaruh terhadap profil kecepatan karena jarak ujung *valve* dengan sisi *inner elbow* yang memiliki kecepatan lebih tinggi cukup dekat, sehingga aliran terarah ke sisi sejajar *inner outlet elbow* dengan kecepatan yang lebih tinggi, sementara untuk kedua posisi *valve* lainnya tidak memberikan pengaruh terhadap profil kecepatan pada daerah *outlet elbow* karena jarak ujung *valve* yang lebih jauh sehingga aliran memiliki waktu untuk berkembang. Setelah aliran melewati *valve* pada $x/D=2$ untuk *valve* dengan $\alpha=0^\circ$ memiliki profil kecepatan dengan gradien yang menurun secara teratur dari sisi sejajar *inner outlet elbow* hingga sisi sejajar *outer outlet elbow*. Pengaruh dari *valve* yang dipasang pada $x/D=1$ dengan $\alpha=30^\circ$ baik CW maupun CCW memperlihatkan adanya percepatan aliran, untuk bukaan ke arah CW percepatan aliran terjadi pada sisi sejajar *inner outlet elbow* karena

pada sisi ini mengalami *effect nozzle*, sedangkan pada bukaan kearah CCW terjadi pada sisi sejajar *outer outlet elbow* karena *effect nozzle* terjadi pada sisi ini.

Perkembangan profil kecepatan untuk *valve* yang dibuka penuh dengan $\alpha=0^\circ$ terjadi secara bertahap pada $x/D=3$ hingga $x/D=15$ dengan peningkatan kecepatan pada sisi sejajar *inner outlet elbow* dan pengurangan kecepatan pada sisi sejajar *outer outlet elbow*, sehingga profil kecepatan pada aliran mendekati *recovery* pada $x/D=13$. Untuk *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW terjadi perpindahan distribusi kecepatan pada $x/D=3$ yaitu pada sisi sejajar *outer outlet elbow* memiliki kecepatan yang lebih tinggi, kemudian profil kecepatan ini berkembang dengan peningkatan kecepatan pada sisi sejajar *inner outlet elbow* dan penurunan kecepatan pada sisi sejajar *outer outlet elbow* hingga aliran $x/D=15$ dimana profil aliran profil aliran masih jauh dari *recovery*. Perkembangan profil kecepatan untuk *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW memiliki tren yang berlawanan dengan $\alpha=30^\circ$ CW karena daerah akselerasi yang ditimbulkan oleh *valve* juga berlawanan, pada $x/D=3$ terjadi perpindahan distribusi kecepatan dimana pada sisi sejajar *inner outlet elbow* memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibandingkan dengan sisi sejajar *outer outlet elbow*, profil kecepatan ini terus berkembang dengan peningkatan kecepatan pada sisi sejajar *outer outlet elbow* dan penurunan kecepatan pada sisi sejajar *inner outlet elbow* hingga $x/D=15$ profil kecepatan belum mengalami *recovery* karena masih terpengaruh *secondary flow* yang ditimbulkan oleh *elbow* dan *valve*. Secara umum profil kecepatan pada akhir *downstream* di $x/D=15$ untuk *valve* yang dibuka secara penuh dengan $\alpha=0^\circ$ lebih teratur dibandingkan dengan *valve* yang dibuka dengan $\alpha=30^\circ$ CW maupun CCW, dan aliran yang melewati *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW hingga akhir *downstream* profil kekepatannya masih jauh dari *fully recovery*.



Gambar 4.26 Perbandingan vektor kecepatan pada *valve* yang dipasang pada sumbu horizontal pada $Re\ 2 \times 10^5$

Perbandingan vektor kecepatan untuk masing-masing posisi *valve* ditampilkan dalam Gambar 4.26 yang ditampilkan dalam beberapa posisi downstream, yaitu pada $x/D=2, 7, 11$, dan 15 . Untuk *valve* yang dibuka dengan $\alpha=0^\circ$ *secondary flow* pada aliran setelah melewati *valve* terlihat intensitasnya cukup kecil dan mulai menyatu hingga pada $x/D=7$ menjadi satu *secondary flow* dengan intensitas yang semakin mengecil hingga akhir *downstream* $x/D=15$, namun masih terdapat *secondary flow* sehingga aliran belum mencapai *fully recovery*. *Secondary flow* pada aliran dengan *valve* yang dipasang pada $\alpha=30^\circ$ CW terlihat lebih kuat dibandingkan pada *valve* dengan $\alpha=0^\circ$ pada posisi $x/D=2$, hal

ini dikarenakan adanya pengaruh dari *valve* yang memecah *secondary flow* yang sebelumnya ditimbulkan oleh *elbow*. *Secondary flow* ini dengan segera menyatu menjadi satu *secondary flow* pada $x/D=7$ dengan intensitas yang lebih kecil dan tidak berubah hingga akhir *downstream*, sehingga profil aliran belum mencapai *fully recovery* pada akhir *downstream*. Hal yang berbeda terlihat pada aliran yang melewati *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW dimana setelah aliran melewati *valve* pada $x/D=2$ terlihat *secondary flow* yang sangat kuat dengan jumlah lebih dari 2, hingga $x/D=7$ *secondary flow* ini masih terus berkembang menjadi 2 *secondary flow* yang menjadi simetris pada $x/D=11$ dan terbawa hingga akhir *downstream* yang menyebabkan aliran tidak mengalami *recovery* pada profil kecepatannya.

-- Halaman ini sengaja dikosongkan --

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisa terhadap simulasi aliran melewati *elbow* dan *butterfly valve* yang telah dilakukan pada bab sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Dari beberapa simulasi yang dilakukan tidak terdapat aliran yang mencapai *fully recovery* pada akhir *downstream* ($x/D=15$), namun *valve* yang dibuka ke arah CCW lebih baik dibandingkan ke arah CW karena profil kecepatan pada *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CCW pada akhir *downstream* lebih mendekati profil *fully recovery* bila dibandingkan dengan *valve* dengan $\alpha=30^\circ$ CW.
2. Valve yang dibuka penuh memiliki *pressure drop* yang kecil, namun meningkat secara signifikan ketika dibuka dengan $\alpha=30^\circ$, bukaan ke arah CCW lebih baik dibandingkan bukaan ke arah CW karena *pressure drop* yang ditimbulkan lebih rendah.
3. Bilangan Reynolds tidak memberikan pengaruh terhadap profil aliran yang melewati *elbow*, namun berpengaruh terhadap aliran ketika melewati *valve*.

5.2 Saran

Simulasi yang telah dilakukan penulis bukan tanpa kekurangan, namun masih banyak hal yang dapat ditingkatkan untuk memperoleh hasil yang lebih baik dalam penelitian selanjutnya, diantaranya sebagai berikut :

1. Pembuatan domain simulasi diusahakan mendekati kondisi aktual, yaitu memiliki kekasaran permukaan. Penggunaan Hexahedral *mesh* sangat disarankan karena memberikan hasil yang lebih baik dan waktu perhitungan yang lebih singkat
2. Kondisi batas disesuaikan dengan kondisi aktual, bila perlu dilakukan pengujian beberapa model turbulen untuk memilih model turbulen yang sesuai. Simulasi disarankan dilakukan pada kondisi *unsteady* untuk memperoleh hasil yang konsisten pada *post-processing*.
3. Panjang daerah *downstream* perlu ditingkatkan, dikarenakan dalam penelitian ini dengan panjang downstream 15D aliran belum mencapai kondisi *fully recovery*.
4. Dalam penelitian selanjutnya dapat dilakukan variasi radius *elbow* dan posisi jarak penempatan *valve*.

DAFTAR PUSTAKA

- A. Dawy, A. Sharara, dan A. Hassan . 2013. **A Numerical Investigation of the Incompressible *Flow* through a *Butterfly Valve* Using CFD**. IJETAE Journal Volume 3, Issue 11, Nov 2013. IJETAE.
- Chapra, Steven, C., Canale, Raymond, P. 2010. **Numerical Methods for Engineers, 6th edition**. New York : The McGraw-Hill Companies, Inc.
- F. Danbon dan C. Sollicec. 2000. **Aerodynamic Torque of a *Butterfly Valve*-Influence of an *Elbow* on the Time-Mean and Instantaneous Aerodynamic Torque**. Nantes: Ecole des Mines de Nantes, Département Systèmes.
- Fluent 6.3 User Guide**. 2006. Lebanon. Fluent Inc.
- Fox, R.W., Mc Donald, A.T. dan Pritchard, P.J. 2011. **Introduction to Fluid Mechanics, 8th edition**. New York: John Wiley and Sons.
- Freitas, Christopher, J. 2002. **The issue of numerical uncertainty**. Applied Mathematical Modelling 26 (2002) 237–248.
- Kim, Jongtae., Yadav, Mohan., Kim, Seungjin,. 2014. **Characteristics of *Secondary flow* Induced by 90-degree *Elbow* in Turbulent Pipe *Flow***. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics Vol. 8, NO. 2, PP.229-239.
- Kim, S. W., Kim, J. H., dan Lee, Y. H., 2007. ***Flow* Characteristics of *Butterfly Valve* by PIV and CFD**. Proceedings of the Fifth International Conference on Fluid Mechanics, Aug.15-19. China: Tsinghua University Press & Springer.
- Malalasekera, W., Versteeg, H., K. 1996. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics**. London : Longman.
- Miller, D.S. 1990. **Internal *Flow* System, 2nd edition**. Bedford: BHRA.
- Nazary, Hossein., Aalipour, Nafise., Alizadeh, Mansour. 2011. **Investigation of the *Flow* and Cavitation in a *Butterfly Valve***. Journal of Mechanical Research and Application, Vol. 3, No. 1, 2011, 37-47.

- Prasun. Dutta, Nandi. Nityananda. 2015. ***Effect of Reynolds Number and Curvature Ratio on Single Phase Turbulent Flow in Pipe Bends.*** Mechanics and Mechanical Engineering Vol. 19, No. 1 (2015) 5–16.
- Takeyoshi, Kimura., Takaharu, Tanaka., Kayo, Fujimoto., Kazuhiko, Ogawa. ***Hydrodynamic Characteristics of A Butterfly Valve – Prediction of Pressure Loss Characteristics.*** ISA Transactions 34, p319-326. 1995. Elsevier.

BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Demak pada November 1987, merupakan anak ke enam dari enam bersaudara. Jalur pendidikan yang ditempuh oleh penulis dimulai pada tahun 1994 di SD Negeri Buko 1 dan lulus pada tahun 2000 yang dilanjutkan pada jenjang menengah di SMP Negeri 1 Wedung dan lulus pada tahun 2003. Setelah lulus dari SMP penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Demak pada tahun 2003 dan menyelesaikan studi pada tahun 2006.

Pada tahun yang sama penulis memulai jenjang pendidikan tinggi pada jalur D3 di Politeknik Negeri Semarang pada Jurusan Teknik Mesin dengan konsentrasi Mesin Produksi. Selama menempuh pendidikan di jenjang D3 penulis bergabung dengan unit kegiatan mahasiswa Pengembangan Pengetahuan dan Robotika. Pada tahun 2009 penulis menyelesaikan pendidikan dengan tugas akhir mengenai pneumatik dan otomasi industri. Setelah lulus, penulis bekerja di PT. Gudang Garam, Tbk hingga akhir tahun 2010 dan melanjutkan berkarya di Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan (PUPR) dari tahun 2011 hingga sekarang.

Pendidikan jenjang S1 ditempuh oleh penulis di Universitas Mercubuana Jakarta dengan Jurusan Teknik Mesin ketika bekerja di Kementerian PUPR pada tahun 2011 dan menyelesaikan pendidikan pada tahun 2012 dengan tugas akhir perancangan alat pencetak tablet. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang S2 di Universitas Mercubuana Jakarta pada Jurusan Manajemen dengan konsentrasi Sumber Daya Manusia yang diselesaikan pada tahun 2014.

Pada tahun 2014 penulis melanjutkan studinya di jenjang S2 di Institut Teknologi Sepuluh Nopember pada Jurusan Teknik Mesin dengan konsentrasi Rekayasa Konversi Energi melalui beasiswa dari program kerjasama Kementerian PUPR dengan pemerintah Belanda dengan program peningkatan kapasitas pengelola air minum di Indonesia, studi ini diselesaikan oleh penulis pada tahun 2015.